

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

KOEXISTENCE SYSTÉMŮ DVB-T2 A LTE V PÁSMU 800 MHZ

COEXISTENCE OF DVB-T2 AND LTE IN THE 800 MHZ BAND

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dominik Walach

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ladislav Polák, Ph.D.

BRNO 2019



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: Dominik Walach

ID: 195468

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Koexistence systémů DVB-T2 a LTE v pásmu 800 MHz

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce prostudujte pásmo UHF 800 MHz, které po první digitální dividendě (tzv. DD1) v Evropě bylo vyhrazené pro vysílání terestrické digitální TV, zajištěna standardem DVB-T/T2, a pro poskytování mobilních služeb, zajištěna standardem LTE. Definujte společné frekvenční pásmo, ve kterém systémy DVB-T2 a LTE by mohli koexistovat. Navrhněte kompletní laboratorní měřicí pracoviště a vhodnou metodiku pro měření a vyhodnocení koexistence mezi uvažovanými systémy.

V experimentální části práce proveďte měření vlivu systému LTE na DVB-T2. Při měření uvažujte různé systémové parametry pro DVB-T2 a LTE. Získané výsledky přehledně vyhodnoťte a diskutujte. Na základě získaných výsledků navrhněte laboratorní úlohu pro měření koexistence mezi systémy DVB-T2 a LTE v pásmu 800 MHz a připravte vzorové vypracování navržené úlohy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] PLAISNER, Denis. Koexistence stávajících a nových generací zemské digitální televize a mobilních bezdrátových komunikačních služeb. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2015. 76 s., 24 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Ladislav Polák, Ph.D.

[2] RIBADENEIRA-RAMIREZ, Jefferson, Gerardo MARTINEZ, David GOMEZ-BARQUERO a Narcis CARDONA. Interference Analysis Between Digital Terrestrial Television (DTT) and 4G LTE Mobile Networks in the Digital Dividend Bands. IEEE Transactions on Broadcasting 2016, 62(1), 24-34. ISSN 0018-9316.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 23.5.2019

Vedoucí práce: doc. Ing. Ladislav Polák, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá zkoumáním, měřením a vyhodnocením koexistenčních scénářů, které mohou nastat mezi systémy DVB-T2 a LTE v UHF pásmu 800 MHz. Oba systémy DVB-T2 a LTE jsou stručně popsány a jsou definované jejich společná frekvenční pásma. Pro měření, analýzu a vyhodnocení scénářů souběžného vysílání DVB-T2 a LTE ve společném UHF pásmu je navrženo a realizováno vhodné laboratorní pracoviště. Vliv koexistence se vyhodnocuje objektivně (měření analyzátozem TV signálu) a subjektivně (sledování výpadku vysílání na TV obrazovce). Koncepte navrhovaného měřicího pracoviště je ověřena rozsáhlými měřeními.

Klíčová slova

DVB-T2, LTE, UHF pásmo, koexistence, interference, RF měření, ochranný poměr

Abstract

This bachelor thesis deals with the study, measurement and evaluation of coexistence scenarios which can occur between DVB-T2 and LTE systems in the UHF band 800 MHz. Both DVB-T2 and LTE systems are briefly described, and their common radiofrequency bands are defined. An appropriate laboratory workplace is proposed and realized for the measurement, analysis and evaluation of the coexistence scenarios between DVB-T2 and LTE. The effect of coexistence is evaluated objectively (measurement done by TV signal analyzer) and subjectively (monitoring of broadcasting outage on TV screen). Concept of the proposed measurement setup is verified by extensive measurements.

Keywords

DVB-T2, LTE, UHF band, coexistence, interference, RF measurement, protection ratio

Bibliografická citace:

WALACH, D. *Koexistence systémů DVB-T2 a LTE v pásmu 800 MHz*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019. 66 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ladislav Polák, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Koexistence systémů DVB-T2 a LTE v pásmu 800 MHz* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ladislavu Polákovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

Obsah

Úvod	1
1 Digitální vysílání DVB-T2	2
1.1 Úvod do DVB-T2	2
1.2 Vstupní předzpracovávací jednotka	2
1.3 Vstupní zpracování	3
1.4 Blok prokládání, kódování a modulace	3
1.4.1 Kódování	4
1.4.2 Bitové prokládání a mapování do COFDM buněk	4
1.4.3 Prokládání buněk	4
1.4.4 Sestavení rámce	4
1.4.5 Vytvoření OFDM symbolů	4
1.4.5 Převod OFDM symbolu do časové oblasti	5
2 LTE	6
2.1 Přístupová síť E-UTRAN	7
2.2 Páteřní síť EPC	7
2.3 Downlink E-UTRAN	7
2.4 Uplink E-UTRAN	8
2.5 Technika MIMO v systému LTE	8
3 Koexistence mezi DVB-T2 a LTE	9
3.1 První digitální dividenda	9
3.2 Typy koexistence	10
4 Princip měření koexistence systému DVB-T2 a LTE	11
4.1 Blokové schéma	11
4.2 Podstatné parametry měření pro LTE a DVB-T2	11
4.2.1 Parametry společné pro DVB-T2 a LTE	12
4.2.2 Parametry pouze pro DVB-T2	12
4.2.3 Parametry pouze pro LTE	12
4.3 Použité měřicí přístroje	12

4.4 Způsob vyhodnocování.....	14
5 Měření koexistenčních scénářů.....	15
5.1 Představení jednotlivých scénářů.....	15
5.1.1 Scénář č. 1.....	15
5.1.2 Scénář č. 2.....	16
5.1.3 Scénář č. 3.....	16
5.1.4 Nastavení LTE.....	17
5.2 Výsledky měření prvního scénáře.....	18
5.3 Výsledky měření druhého scénáře.....	23
5.4 Výsledky měření třetího scénáře.....	28
Závěr	33
Literatura	34
Seznam příloh.....	37

Seznam symbolů a zkratek

Zkratky:

AF	Application Function
BB	Base-Band
BCH	Bose-Chaudhuri-Hocquenghem
BER	Bit Error Ratio
C	Carrier
C/I	Carrier-to-Interference
C/N	Carrier-to-Noise
COFDM	Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing
CP	Cyclic Prefix
CPE	Common Phase Error
CR	Code Ratio
CRC-8	Cyclic Redundancy Check
DA	Digital-to-Analog
DNP	Deleted Null Packets
DTT	Digital Terrestrial Television
DVB-T	Digital Video Broadcasting - Terrestrial
DVB-T2	Digital Video Broadcasting – Second Generation Terrestrial
DwPTS	Downlink Pilot Timeslot
eNodeB	evolved Node B
EPC	Evolved Packet Core
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access
EVM	Error vector Magnitude
FCP	Frame Closing Pilots
FDD	Frequency Division Duplexing
FEC	Forward Error Correction
FEF	Future Extension Frame
Full HD	Full High Definition
GB	Guard Band
GI	Guard Interval
GP	Guard Period
GS	Generic Stream

GSM	Global System for Mobile
I	Interference
IF	Interleaving Frame
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
LDPC	Low-Density Parity-Check
LTE	Long Term Evolution
LTE-DL	Long Term Evolution Downlink
LTE-UL	Long Term Evolution Uplink
MER	Modulation Error Ratio
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MUMIMO	Multiple User Multiple Input Multiple Output
NF	Noise Figure
NPD	Null Packet Deletion
ODFMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
PCC	Police and Charging Control
PLPs	Physical Layer Pipes
PRBS	Pseudo Random Binary Sequence
QEF	Quasi Error Free
Qos	Quality of Service
R&S	Rohde & Schwarz
RB	Resource Block
RF	Radio Frequency
SC-DFMA	Single Carrier – Frequency Division Multiple Access
Set-Top-Box	STB
SFN	Single Frequency Network
SISO	Single Input Single Output
SPC	Serial Parallel Convertor
TDD	Time Division Duplexing
TI	Time Interleaver
TS	Transport Stream
UE	User Equipment
UHD	Ultra High Definition
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UpPTS	Uplink Pilot Timeslot

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Zjednodušené blokové schéma DVB-T2 (na základě [10])	2
Obr. 1.2 Příklad mapování více zdrojů na jeden kanál fyzické vrstvy	2
Obr. 1.3 Vstupní zpracování	3
Obr. 1.4 Blokové schéma bitového prokládání, kódování a modulace (BICM modul)	3
Obr. 2.1 Architektura sítě LTE (převzato z [7])	6
Obr. 2.2 Zpracování signálu LTE-downlink (LTE-DL)	8
Obr. 3.1 Znázornění rozložení TV pásem a vlastností elektromagnetických vln (na základě [1])	9
Obr. 3.2 Rozdělení pásma 800 MHz (na základě [15])	9
Obr. 3.3 Typy koexistenčních scénářů	10
Obr. 4.1 Blokové schéma měřicího pracoviště DVB-T2 a LTE	11
Obr. 4.2 Rozložení měřicího pracoviště	13
Obr. 4.3 Použití Set-Top-Boxy v měření	14
Obr. 5.1 Ilustrační zobrazení prvního scénáře	15
Obr. 5.2 Ilustrační zobrazení druhého scénáře	16
Obr. 5.3 Ilustrační zobrazení třetího scénáře	17
Obr. 5.4 Závislost parametru C/I na parametru B_{LTE} při původním nastavení prvního scénáře	18
Obr. 5.5 Závislost parametru C/I na parametru B_{LTE} u prvního scénáře	20
Obr. 5.6 Závislost parametru C/I na parametru B_{LTE} u prvního scénáře při změně modulace 64QAM	20
Obr. 5.7 Závislost parametru C/I na parametru B_{LTE} u prvního scénáře při změně modulace na 64QAM a CR=4/5	20
Obr. 5.8 Konstelační diagramy pro modulaci 256QAM, $B_{LTE}=20$ MHz a) Samotný signál DVB-T2 bez rušení b) Shodné výkonové úrovně DVB-T2 a LTE (-60 dBm) s 1 MHz GB c) Překročení tzv. QEF hranice	22
Obr. 5.9 RF spektrum DVB-T2 a LTE ($B_{LTE}=3$ MHz), GB=1 MHz, Center=787 MHz, Span=14 MHz	22

Obr. 5.10 Závislost parametru C/I na parametru B_{LTE} při původním nastavení druhého scénáře	23
Obr. 5.11 Závislost parametru C/I na parametru B_{LTE} u druhého scénáře při rotované konstelaci	25
Obr. 5.12 Závislost parametru C/I na parametru B_{LTE} u druhého scénáře při změně ochranného intervalu na 1/16.....	25
Obr. 5.13 Závislost parametru C/I na parametru B_{LTE} u druhého scénáře při změně kódového poměru na 4/5.....	25
Obr. 5.14 Konstelační diagramy pro modulaci 16QAM, $B_{LTE}=20$ MHz a) Samotný signál DVB-T2 bez rušení b) Shodné výkonové úrovně DVB-T2 a LTE (-60 dBm) s 1 MHz GB c) Překročení QEF hranice	27
Obr. 5.15 RF spektrum DVB-T2 a LTE ($B_{LTE}=10$ MHz), GB=1 MHz, Center=789 MHz, Span=25 MHz.....	27
Obr. 5.16 Závislost parametru C/I na parametru B_{LTE} při původním nastavení třetího scénáře	28
Obr. 5.17 Závislost parametru C/I na parametru B_{LTE} u třetího scénáře při změně ochranného intervalu na 1/16 a Pilot Pattern na PP8.....	30
Obr. 5.18 Závislost parametru C/I na parametru B_{LTE} třetího scénáře při změně modulace na 256QAM.....	30
Obr. 5.19 Závislost parametru C/I na parametru B_{LTE} třetího scénáře při změně kódového poměru na 1/2.....	30
Obr. 5.20 Konstelační diagramy pro modulaci 64QAM, $B_{LTE}=20$ MHz a) Samotný signál DVB-T2 bez rušení b) Shodné výkonové úrovně DVB-T2 a LTE (-60 dBm) s 1 MHz GB c) Překročení QEF hranice	32
Obr. 5.21 RF spektrum DVB-T2 a LTE ($B_{LTE}=15$ MHz), GB=1 MHz, Center=793 MHz, Span=26 MHz.....	32
Obr. 1 Zobrazení rozložení spektra 800 MHz	40

Seznam tabulek

Tab. 1.1 Kombinace velikosti FFT a ochranného intervalu SISO (na základě [10])..	5
Tab. 5.1 Systémové parametry prvního scénáře	15
Tab. 5.2 Systémové parametry druhého scénáře	16
Tab. 5.3 Systémové parametry třetího scénáře	17
Tab. 5.4 Nastavení systémových parametrů LTE	17
Tab. 5.5 Experimentální změny v modulaci LTE pro první scénář.....	19
Tab. 5.6 Experimentální změny v modulaci LTE pro druhý scénář.....	24
Tab. 5.7 Experimentální změny v modulaci LTE pro třetí scénář.....	29

ÚVOD

Digitální pozemní TV vysílání nahradilo analogové TV vysílání z důvodu efektivnějšího vysílání v rámci stejného frekvenčního pásma. Digitální TV vysílání umožňuje vysílat více programu v jednom multiplexu a přenos je kvalitnější. V roce 2005 se začalo vysílat nejdříve programy České televize a Českého rozhlasu. V dalších letech se zvětšil počet programů a také multiplexů. Každý multiplex obsahuje různý počet televizních kanálů.

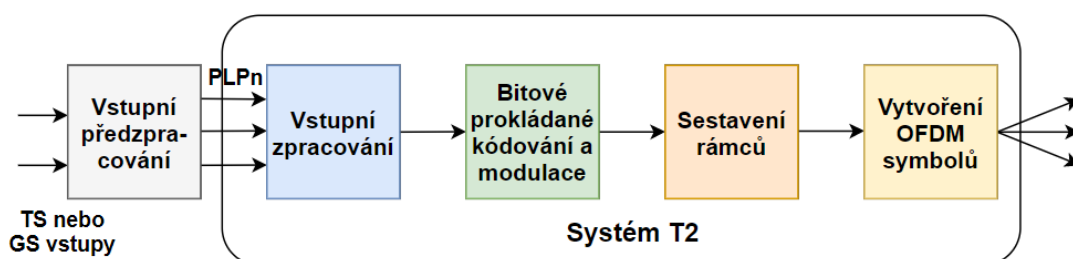
Přechod z analogového TV vysílání zapříčinil uvolnění kmitočtového spektra, především v rozsahu 470 až 862 MHz (IV. a V. pásmo). Toto pásmo bylo rozděleno mezi digitální televizi, rozhlasové služby a telekomunikační systém Long Term Evolution (LTE). Tato změna kmitočtového rozsahu digitální televize se provedla kvůli zvyšujícímu se počtu uživatelů LTE a příznivým přenosovým podmínkám radiofrekvenčních (RF) signálů v tomto pásmu. Aby byly splněny podmínky pro kvalitu a rychlý přenos LTE, je nutné rozšířit stávající RF pásma pro LTE. Z tohoto důvodu je použit nástupnický standard Digital Video Broadcasting – Second Generation Terrestrial (DVB-T2). Umožňuje lepší využití RF spektra a přenos více TV programů v lepší kvalitě. Ke vzájemnému ovlivňování DVB-T2 a LTE dochází na frekvenci 790 MHz, kde je pouze 1 MHz ochranného pásma mezi RF spektry těchto systémů. V současné době se přechází na DVB-T2 pomocí přechodových sítí (sítě 11,12 a 13). Vysílače DVB-T budou od listopadu 2019 postupně vypínány. Zbytek vysílačů DVB-T bude vypnut průběžně v roce 2020 [1],[2].

Tato práce se zabývá měřením a analýzou koexistenčních scénářů, které mohou vzniknout mezi systémy DVB-T2 a LTE v pásmu 800 MHz. První kapitola obsahuje základy standardu DVB-T2, blokový diagram a signálové zpracování na fyzické vrstvě. Druhá kapitola se podrobně věnuje systému LTE, vysvětluje jeho buňkovou strukturu a způsob přenosu dat. Obsah třetí kapitoly pojednává o první digitální dividendě a definuje společné pásmo systémů DVB-T2 a LTE a přímo navazuje na čtvrtou kapitolu. Ta se věnuje praktické části, jako je návrh měřicího pracoviště a zvolení měřících přístrojů. V páté kapitole jsou definované 3 koexistenční scénáře, experimentálně se mění příslušné parametry, projevené změny v odolnosti jsou řádně okomentované. Každý scénář je proměřený pro všechny dostupné šířky pásma LTE. Následuje závěr a seznam příloh, které obsahují návrh laboratorní úlohy a její vzorové vypracování. Laboratorní úloha se věnuje měření koexistence systémů DVB-T2 a LTE ve frekvenčním pásmu 800 MHz, zaměřuje se především na subjektivní posouzení výpadku TV vysílání vlivem interferencí v přenosu.

1 DIGITÁLNÍ VYSILÁNÍ DVB-T2

1.1 Úvod do DVB-T2

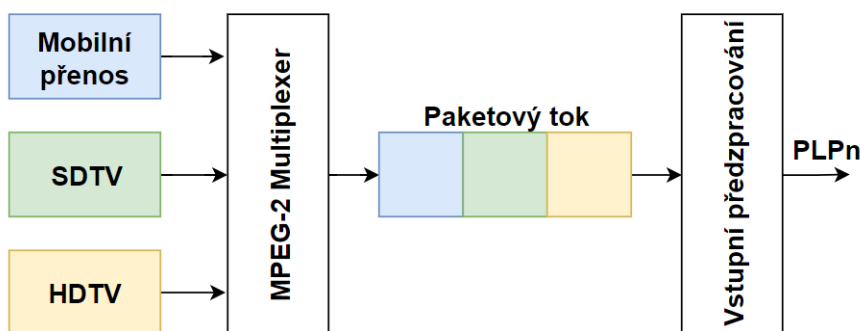
Pozemní digitální vysílání DVB-T2 je nástupnický standard digitálního televizního vysílání přes pozemní vysílače, který vychází z původního standardu DVB-T [3]. Oproti DVB-T má výhodu efektivnějšího přenosu obrazu a zvuku, a lepší využití kmitočtového pásma při stejných přenosových podmínkách. Zpětná kompatibilita z DVB-T není možná, je nutné si pořídit novou televizi s tunerem, případně Set-Top-Box (STB) pro příjem a dekódování TV signálu. Zjednodušené blokové schéma systému DVB-T2 je znázorněné na Obr. 1.1.



Obr. 1.1 Zjednodušené blokové schéma DVB-T2 (na základě [10])

1.2 Vstupní předzpracovávající jednotka

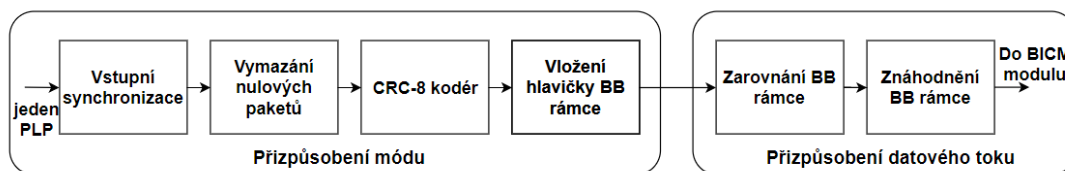
Vstupní předzpracovávající jednotka není přímo součástí systému DVB-T2. Její funkce spočívá v mapování jednoho nebo více transportních toků (Transport Stream-TS) a jednoho nebo více obecných toků (Generic Stream-GS). GS tok nemá fixní velikost paketu jako TS. Vstupní předzpracování sleduje a rozřazuje vyskytující se GS a TS toky do jednotlivých vstupních datových toků systému DVB-T2, označovaných jako Physical Layer Pipes (PLPs). Systém teoreticky umožňuje přenos až 256 PLP současně [5]. Jednotlivé kanály fyzické vrstvy dokáží fungovat nezávisle na sobě a je možné u každé vrstvy využívat jinou modulaci, kódování, rychlost přenosu, či např. typ dat. Lze také definovat jinou robustnost zabezpečení PLP. Příklad mapování více zdrojů je zobrazen na Obr. 1.2.



Obr. 1.2 Příklad mapování více zdrojů na jeden kanál fyzické vrstvy

1.3 Vstupní zpracování

První součást DVB-T2 systému je vstupní zpracování přijatého paketů. Lze jej rozdělit na 2 části: přizpůsobení módu a přizpůsobení datového toku.



Obr. 1.3 Vstupní zpracování

Nejprve dochází k přizpůsobení módu, ten se stará o rozdělení datového toku do datových bloků dále známe jako BB rámce, ke kterým přidá hlavičku.

Vstupní synchronizace slouží k zaručení konstantní bitové rychlosti (Constant Bit Rate-CBR). Je to volitelný blok, který se využívá při zpracování více PLP.

Tzv. blok Null Packet Deletion (NPD) odstraní nulové bity, které byly vloženy ve vstupní předzpracovací jednotce pro uchování konstantní bitové rychlosti. V přenosu představují redundanci, proto jsou smazány, avšak v informačním bajtu Deleted Null Packets (DNP) je uložena informace o tom kolik nulových paketů bylo smazáno, pro následné obnovení na příjímací straně.

Cyklický redundantní kód (Cyclic Redundancy Check--CRC-8) slouží k ověření integrity bloku dat.

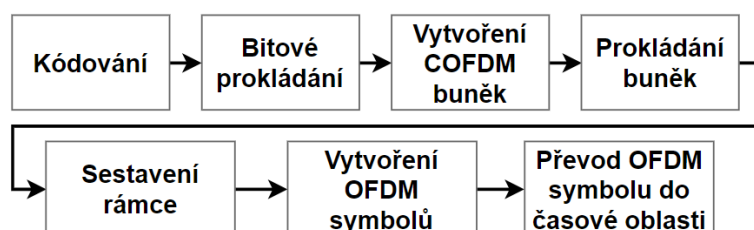
Hlavička BB rámce má fixní velikost 10 bajtů a obsahuje informace z předchozích bloků a další informace o datovém toku [10].

Přizpůsobení datového toku provádí zarovnání (tzv. padding) BB rámce, pokud není BB rámec zcela zaplněn uživatelskými daty dojde k nastavení jeho konstantní délky. Ta závisí na zvoleném Low Density Parity Check (LDPC) poměru.

Následuje znáhodnění kompletního BB rámce, využívá se Pseudo Random Binary Sequence (PRBS) pro energetické rozptěnění signálu. Vznikne náhodný BB rámec, který pokračuje do BICM modulu [10].

1.4 Blok prokládání, kódování a modulace

Všechny bloky od Forward Error Correction (FEC) kódování až po převod Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) symbolu do časové oblasti jsou přehledně zobrazené v Obr. 1.4. Dále budou všechny jednotlivé bloky stručně popsány.



Obr. 1.4 Blokové schéma bitového prokládání, kódování a modulace (BICM modul)

1.4.1 Kódování

Dopředná oprava chyb (FEC), je zabezpečení signálu pomocí přidané redundance. Dělí se na vnější a vnitřní kódování.

Vnější kódování chrání zdrojové symboly před skupinovými burst chybami. Tento subsystém provádí vnější Bose-Chaudhuri-Hocquenghem (BCH) kódování.

Vnitřní lineární samoopravné kódování LDPC se vyznačuje vysokou efektivitou a nízkou hustotou kontroly parity. Nevýhodou je větší náročnost na hardware a časová náročnost při dekódování. FEC rámec pro DVB-T2, má fixní délku 64 800 bitů [12], [16].

1.4.2 Bitové prokládání a mapování do COFDM buněk

Bitové prokládání se provádí z důvodu zabezpečení dat při přenosu proti shlukovým chybám. FEC rámce jsou dále mapovány do Coded OFDM (COFDM) buněk. Tyto buňky jsou dále normalizované, aby jejich střední úroveň byla rovna 1 [5]. Prokládání se používá u všech dostupných vnitřních modulací (16QAM, 64QAM a 256QAM), kromě QPSK, kde se symboly skládají pouze ze dvou bitů, a nemělo by to tedy význam.

Možnost rotace konstelačního diagramu a cyklické zpoždění Q složky zaručuje, že jsme schopni určit nosnou z jedné hodnoty každé COFDM buňky, avšak tato možnost je velmi náročná na výpočetní výkon a vyžaduje více času.

Cyklické zpoždění Q složky zaručuje, že složky v komplexní rovině IQ jsou následujícími prokládacími procesy přenášeny odděleně na různých frekvencích a v jiném čase. Každá z těchto složek nese dostatečnou informaci o tom, jaká COFDM buňka se přenáší [5].

1.4.3 Prokládání buněk

Po natočení COFDM buněk nastává jejich seskupení do FEC bloků. Pseudonáhodné prokládání COFDM buněk se využívá k potlačení shlukových chyb. Nosné jsou na sebe vzájemně ortogonální, maximum každé nosné je v minimu jiné. Tímto způsobem je daný signál odolnější vůči odrazům od budov, které vznikají během přenosu. Přenášené bity mohou měnit svoje hodnoty vlivem Inter Symbol Interference (ISI) a TV signál může být silně poškozen [10].

1.4.4 Sestavení rámce

Následuje seskupení již proložených FEC bloků do Interleaving Frame (IF) rámců. Ty mohou mít různé velikosti a mapují se do jednoho nebo více T2 rámců. Nejvyšším přenosovým celem je Super rámec, který se skládá až z 255 T2 rámců [10].

1.4.5 Vytvoření OFDM symbolů

Aktivní nosné se skládají z několika typů nosných. První jsou datové, které nesou užitečnou informaci, dále pilotní, které se dělí na: rozptýlené, spojitě, okrajové, P2 nebo uzavírající rámec pilotní buňky.

Rozptýlené nosné nemají stálou pozici a jsou rozprostřené po celém spektru. Používají se k ekvalizaci T2 rámce na straně přijímače. Mají až osm různých variant rozmístění nosných, kdy PP1 má nejhustší rozmístění a PP8 nejřidší [5]. Pro DVB-T2 se převážně používají PP2 a PP3 pro delší dobu ochranného intervalu (1/8) [19].

Pilotní spojité nosné jsou využívány pro korekci společné fázové chyby, a také pro frekvenční a časovou synchronizaci. Mají ustálenou pozici COFDM symbolů, na rozdíl od rozptylných nosných.

Okrajové nosné jsou rozmístěny na okrajích aktivních nosných a jejich funkce je doplňovat rozptýlené nosné v odhadu kmitočtové charakteristiky přenosového kanálu až po okraj spektra.

P2 nosné slouží pro přenos L1 signalizace. Ta nese informace o počtu nosných, modulacích a kódování.

Nosné uzavírající rámec jsou využívány pro odhad přenosového kanálu a korekci Common Phase Error (CPE) [10].

1.4.5 Převod OFDM symbolu do časové oblasti

Dalším krokem je úprava kompletních OFDM symbolů ve frekvenční oblasti do oblasti časové. Tohoto převodu lze dosáhnout pomocí Inverse Fast Fourier Transform (IFFT). Je nutné zamezit vzájemné ovlivňování jednotlivých COFDM vln, které se mohou dostat k přijímači v různých zpožděních, způsobených odrazy od budov a objektů. K tomu se využívá Guard Interval (GI), jenž je vložený mezi každý vysílaný symbol. Jeho délka je definována jako poměr délky trvání ochranného intervalu a trvání jednotlivého COFDM symbolu [10].

Tab. 1.1 Kombinace velikosti FFT a ochranného intervalu SISO (na základě [10])

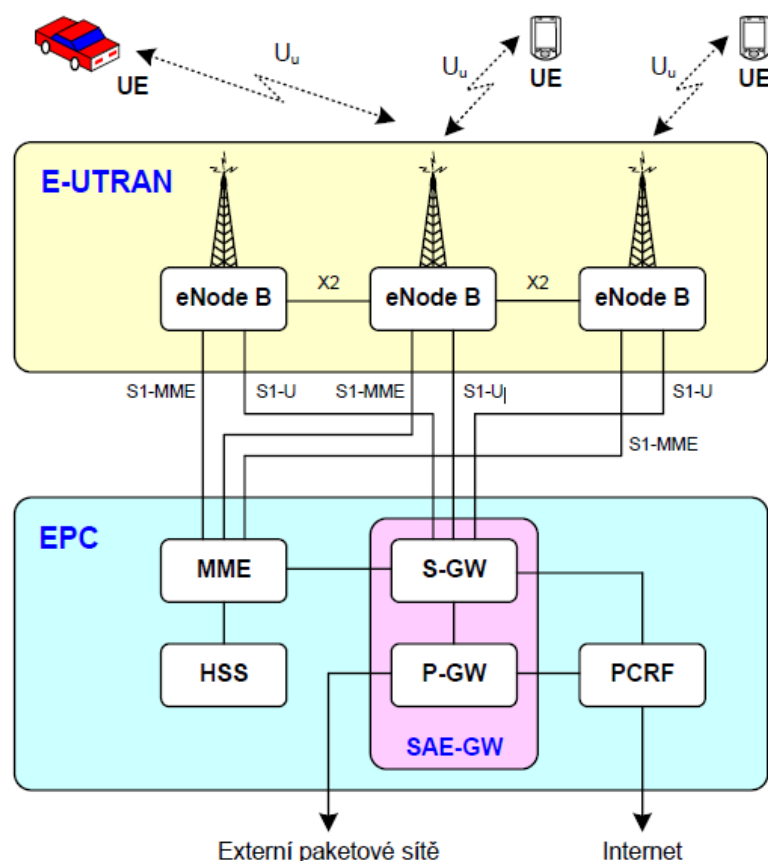
Velikost FFT	Ochranný interval						
	1/128	1/32	1/16	19/256	1/8	19/128	1/4
32K		PP6	PP4	PP4	PP2	PP2	NA
16K		PP7	PP4	PP4	PP2	PP2	PP1
		PP6	PP5	PP5	PP3	PP3	
8K		PP7	PP4	PP4	PP2	PP2	PP1
			PP5	PP5	PP3	PP3	
4K, 2K	NA	PP7	PP4	NA	PP2	NA	PP1
			PP5		PP3		
1K	NA	NA	PP4	NA	PP2	NA	PP1
			PP5		PP3		

Poznámka: NA znamená, že kombinace FFT a ochranného intervalu není povolena. Prázdné políčko dovoluje kombinaci FFT a ochranného intervalu, ale uzavírající rámce se nikdy nepoužije

2 LTE

Long Term Evolution (LTE) je technologie určená pro vysokorychlostní internet v mobilních sítích. Je nástupcem Global System for Mobile communications (GSM) a vzniklo na základech systému Universal Mobile Telecommunications System (UMTS). V současné době je nejrozšířenějším standardem pro mobilní telefony na světě. Teoretická rychlost stahování (downlink) je 172,8 Mbit/s a odesílání (uplink) 57,6 Mbit/s. V České republice LTE vysílá v 5 pásmech. Táto práce se bude věnovat pouze pásmu 20, které pokrývá většinu České republiky, využívající frekvenci 800 MHz [13].

LTE je plně duplexní systém, může přijímat a zároveň i vysílat. Komunikace může probíhat symetricky, či nesymetricky. Systém umožňuje úplný kmitočtový duplex (Frequency Division Duplexing-FDD) pro párová pásma a úplný časový duplex (Time Division Duplexing-TDD) pro nepárová pásma. Je ještě možnost kombinace těchto dvou duplexů, FDD/TDD kdy se uplink a downlink střídají po určité časové konstantě v přenosu.



Obr. 2.1 Architektura sítě LTE (převzato z [7])

Základní rozložení LTE bloků lze vidět na Obr. 2.1. Uživatel, který používá LTE ve svém telefonu je označován jako User Equipment (UE) a má nejbliže k bloku Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRAN).

2.1 Přístupová síť E-UTRAN

Tento blok má za úkol spojit uživatele se základovými stanicemi Evolved Node B (eNB). Jedna stanice eNB může obsluhovat více zařízení UE, ale jedno zřízení UE může být připojené pouze k jedné eNB. Stanice řídí přidělování frekvenčních kanálů pro UE, komunikace probíhá pomocí paketů. Rádiové spojení mezi UE a eNB se označuje jako Uu. Propojení mezi E-UTRAN a Evolved Packet Core (EPC) je realizováno pomocí metalických či optických kabelů.

Každý eNB plní funkci základové stanice i řídicí jednotky rádiové sítě. Zajišťuje rádiové zdroje, pokrytí dané oblasti rádiovým signálem a přiděluje rádiové prostředky podle požadavků kvality služeb Quality of Service (QoS) [7].

2.2 Páteřní síť EPC

Blok MME je hlavním řídicím prvkem LTE sítě. Může obsluhovat několik eNBs, avšak uživatelská data přes něj neprocházejí. Kontroluje přístup do sítě a provádí ověření totožnosti.

Databáze profilů HSS je spojená se všemi MME, jsou zde uloženy informace o všech účastnících v síti.

Brána SAE-GW, dělí se na 2 další bloky S-GW a P-GW, a přes ní procházejí všechna uživatelská data.

Blok PCRF, je síťový prvek. Sleduje poskytované služby a kontroluje, jestli kvalita služeb QoS odpovídá uživatelskému profilu.

Bitový tok se nejdříve rozdělí do rámců, doba trvání jednotlivých rámců je 10ms.

Každý TDD rámeček je rozdělen do 10 subrámců, a každý subrámeček se skládá z Downlink Pilot Timeslot (DwPTS), Uplink Pilot Timeslot (UpPTS) a Guard Period (GP). Tyto 3 části mohou mít různé délky, ale jejich součet musí být vždy 1 ms. Existuje 7 konfigurací subrámců downlink, uplink a speciální [23].

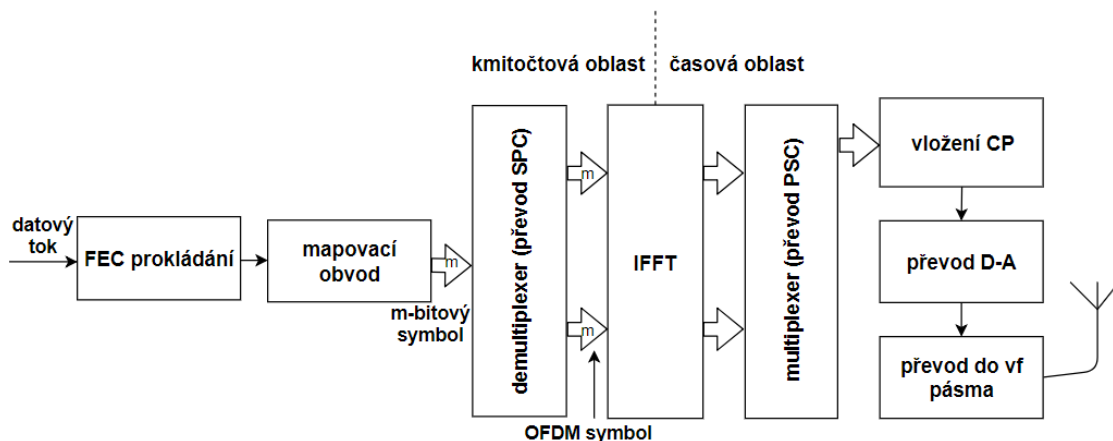
Jednotlivé FDD rámečky je rozdělené na 10 subrámců, každý s dobou trvání 1ms. Všechny subrámečky jsou rozdělené na 2 sloty, jednotlivé sloty obsahují 6 nebo 7 OFDM symbolů podle ochranné doby Cyclic Prefix (CP), ta se volí podle poloměru buňky [7].

2.3 Downlink E-UTRAN

Následující postup úpravy datového toku až po vysílání je přehledně zobrazen na Obr. 2.2. Vstupní datový tok se nejdříve proloží kanálovým kódováním FEC, poté je mapován do n-bitových symbolů podle použité digitální modulace (QPSK, 16QAM, 64QAM).

Sériovo-paralelní převodník SPC vytvoří OFDM symboly, které jsou dále procesorem pomocí IFFT transformované z frekvenční oblasti do časové [18].

Po paralelně sériovém převodu PSC se do signálu vkládá CP, který omezuje vlivy rušení. Následuje Digital-to-Analog (D-A) převod signálu OFDM v základním pásmu. Zbývá konverze signálu do vysokofrekvenčního pásma a vyzáření skrze anténu.



Obr. 2.2 Zpracování signálu LTE-downlink (LTE-DL)

Jednotlivé subnosné OFDM signálu jsou ortogonální. Signál OFDM symbolu je popsán veličinou Peak-to-Average Power Ratio (PAPR), která označuje poměr mezi maximálním a středním výkonem signálu. Nevýhodou OFDM je, že musí mít PAPR co největší, z toho důvodu se využívají vysokofrekvenční výkonové zesilovače. Mobilní telefony nedisponují takovým výkonem, proto se OFDM používá jen pro downlink, kde eNBs stanice zajišťují potřebný výkon. Další nevýhoda je posunutí pracovního kmitočtu vlivem Dopplerova jevu, kde dochází k vzájemnému pohybu vysílače a přijímače. Tento vliv lze částečně eliminovat pomocí CP [6].

2.4 Uplink E-UTRAN

Na rozdíl od downlinku je v uplinku prioritní malý odběr energie zařízení UE, proto se používá přístup Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA). Výhody jsou nízký PAPR, lepší účinnost zesilovače a zmíněný malý odběr UE. Při vytváření signálu se využívá modulace OFDM s rozprostíráním signálu pomocí diskrétní Fourierovy transformace (DTF). Využívá se modulace na jedné nosné. Při přenosu se opět využívá ortogonální subnosné.

Je možné vysílat dvěma způsoby. První je lokalizovaný přenos a druhý distribuovaný. Lokalizovaný přenos vysílá v přiděleném kmitočtovém pásmu, které může být flexibilně adaptováno. Uživatel v distribuovaném přenosu vysílá na celém kmitočtovém pásmu, ale subnosné nejsou orientovány vedle sebe [7].

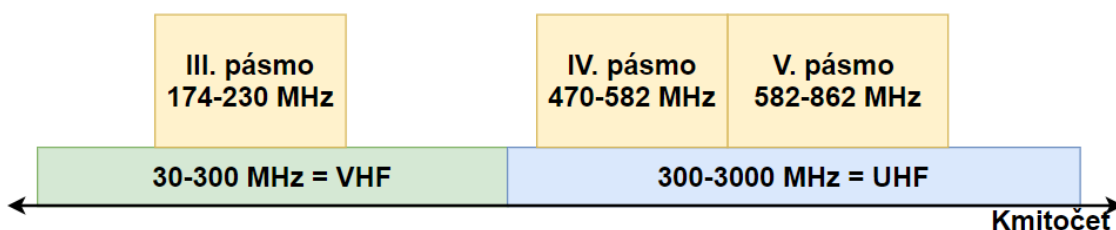
2.5 Technika MIMO v systému LTE

Technika Multiple Input Multiple Output (MIMO), z důvodu vysokých požadavků na přenosovou rychlost a spektrální účinnost, má velmi významnou úlohu na fungování systému LTE. Nabízí větší počet vysílacích antén než Single Input Single Output (SISO) a také uměle navyšuje přenosovou kapacitu v rádiovém kanále. V downlinku se jako základní konfigurace využívá struktura 2x2, to znamená 2 vysílače eNB a 2 antény na straně UE. Další možnosti jsou konfigurace 4x2 a 4x4 [16]. V této práci se využívá pouze režim SISO z důvodu probíhajícího měření v laboratorním prostředí.

3 KOEXISTENCE MEZI DVB-T2 A LTE

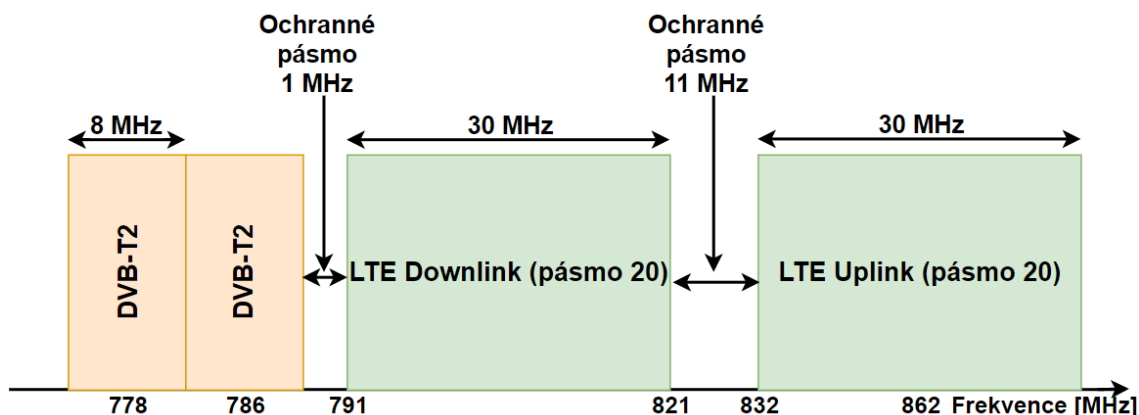
3.1 První digitální dividenda

Rádiové spektrum využíváme dennodenně ať jako diváci televize, zákazníci mobilních telefonních sítí, posluchači rádia, či používáním navigačních systémů. Neustálý posun technologii v před si žádá uvolnění kmitočtů, které již nevyužíváme. Český telekomunikační úřad (ČTÚ) spravuje rádiové spektrum za účelem jeho efektivního využití. První digitální dividenda se zaměřuje především na kmitočtové pásmo 470 MHz až 862 MHz. Toto pásmo bylo po dlouhou dobu vyhrazeno pouze zemskému analogovému televiznímu vysílání. Zvyšující se počet uživatelů mobilního připojení LTE si vyžádal rozšíření provozního RF spektra, aby nedocházelo k zpomalování a horší výkonosti LTE. Nyní se tyto kmitočty dělí mezi III., IV./V. pásmo digitální pozemní televize a 20. pásmo LTE. Klíčové jsou však pásma IV a V, kvůli svým příznivým podmínkám pro šíření UHF rádiových vln, nastíněno v Obr. 3.1. Evropská komise rozhodla o jednotném postupu pro využití zmíněných pásem. Úsek od 470 MHz až do 790 MHz je určen pro vysílání zemské digitální televize vysíláči o velkém výkonu. Horní mez od 791 MHz do 862 MHz využívá LTE [1],[3].



Obr. 3.1 Znárodnění rozložení TV pásem a vlastností elektromagnetických vln (na základě [1])

Tento koexistenční scénář je nutné důkladně analyzovat a určit při jaké intenzitě signálu LTE a dalších systémových parametrů LTE (kódování, modulace, šířka pásma) dochází ke zhoršení kvality TV obrazu, či jeho výpadku. Možné rozdělení uvažovaného pásma je znázorněné na Obr. 3.2.



Obr. 3.2 Rozdělení pásma 800 MHz (na základě [15])

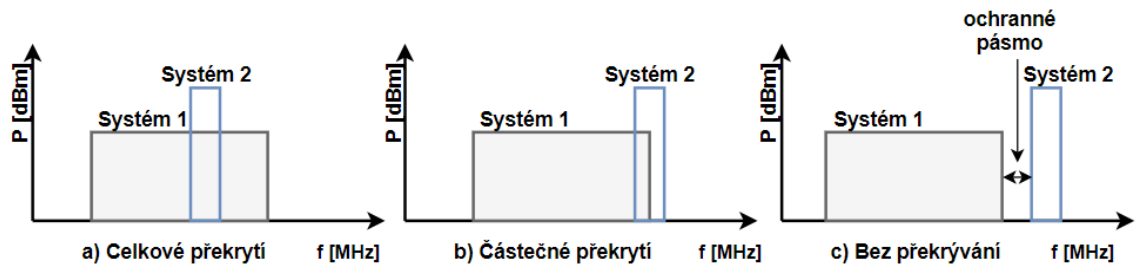
3.2 Typy koexistence

Koexistence dvou sítí se dají rozdělit na 3 základní typy.

První typ nastává, když pracovní kmitočty rušeného a rušícího signálu jsou stejné (tzv. Full Overlapping) viz Obr. 3.3 a). Tento způsob se v současné době již nenastává.

Druhý typ nastává při částečném překrývání frekvenčních pásem (tzv. Partial Overlapping). Takový koexistenční scénář nastane, pokud RF Signál 2 neleží v celém rozsahu RF kanálu Systému 1, ale například se jen částečně překrývají. Tento typ koexistence také již nenastává.

Třetím scénářem, který bude představen je, když se oba signály nepřekrývají, ale nacházejí se v bezprostřední blízkosti a jsou oddělené ochranným pásmem (Guard Band-GB). Tímto koexistenčním scénářem se zabývá tato bakalářská práce. Zmíněné koexistenční scénáře bezdrátových systémů jsou znázorněné na Obr. 3.3.



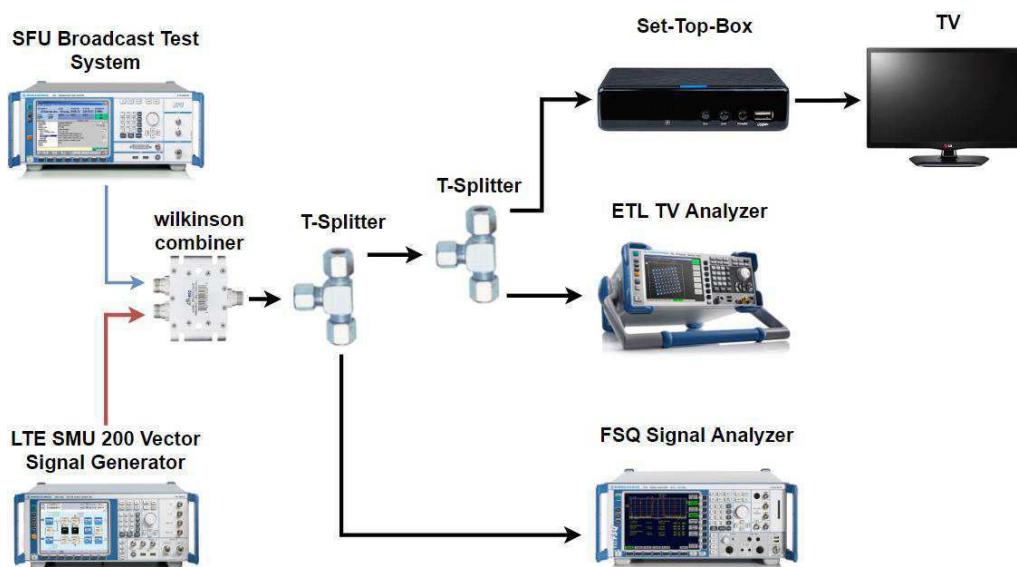
Obr. 3.3 Typy koexistenčních scénářů

4 PRINCIP MĚŘENÍ KOEXISTENCE SYSTÉMU DVB-T2 A LTE

4.1 Blokové schéma

Blokové schéma bylo navrženo podle zadání práce. Následně byl zvolený vhodný postup měření a vyhodnocení koexistenčních scénářů mezi DVB-T2 a LTE v laboratorních podmínkách.

Kompletní RF signály DVB-T2 a LTE, na základě zvolených systémových parametrů, jsou vygenerovány v testovacích generátorech od Rohde & Schwarz (R&S) SFU a SMU 200A. Následně se oba RF signály spojí v slučovači. Směs RF signálů je poté rozdělena na 2 části. První směřuje do spektrálního analyzátoru FSQ (měření výkonu signálu v daném kanále) a druhá do R&S ETL TV analyzátoru a STB+TV, kde je možné posoudit degradace kvality TV signálu objektivně a subjektivně. Na analyzátoch FSQ a ETL-TV je možné si zobrazit oba vygenerované RF signály současně (s útlumem, který vzniká během přenosu) a upravit vzájemnou pozici RF podle současného měření.



Obr. 4.1 Blokové schéma měřicího pracoviště DVB-T2 a LTE.

4.2 Podstatné parametry měření pro LTE a DVB-T2

Pro účinnou analýzu koexistence obou signálů je nutné zaměřit se na několik parametrů, které jsou podstatné pro přenos a správné zobrazení v cílovém médiu. Každý ze signálů LTE a DVB-T2 má tyto parametry jiné.

4.2.1 Parametry společné pro DVB-T2 a LTE

Úroveň signálu – nastavuje se na generátoru, během přenosu přes rozbočovač/slučovač, koaxiální vedení a ostatní prvky obvodu jako jsou redukce atd., se část výkonu utlumí. Je nutné se řídit úrovněmi na analyzátorech. Jednotky jsou dBm.

Parametr C/I – Pro vyhodnocování odolnosti DVB-T2 signálu vůči rušícímu LTE je použit parametr *Carrier-to-Interference ratio (C/I)*, kde *Carrier (C)* je úroveň signálu na vstupu DVB-T2 přijímače a *Interference (I)* je úroveň rušícího signálu LTE. Poměr C/I se pak vypočte jako $C/I \text{ [dB]} = C \text{ [dBm]} - I \text{ [dBm]}$.

4.2.2 Parametry pouze pro DVB-T2

Bit Error Ratio (BER)

Bitová chybovost je definována poměrem chybně přijatých bitů ku celkovému počtu přijatých bitů za určitou dobu měření. Tento parametr se měří před a za dekodérem LDPC. Pro nerušený příjem DVB-T2 vysílání se předpokládá hodnota menší nebo rovná $1 \cdot 10^{-7}$. Tato hraniční hodnota za LDPC dekodováním se označuje jak bezchybný přenos tzv. Quasi-Error-Free (QEF) [25].

Modulation Error Ratio (MER)

Modulační chybový poměr vyjadřuje úroveň šumu, který snižuje rozpoznatelnost fáze a amplitudy jednotlivých nosných vln. Jestliže dojde k překročení hraničních hodnot tuneru TV přijímače, může dojít ke špatnému vyhodnocení přijatých dat. Čím větší hodnota tím menší je úroveň rušení. Vyjadřuje se v jednotkách dB [11].

4.2.3 Parametry pouze pro LTE

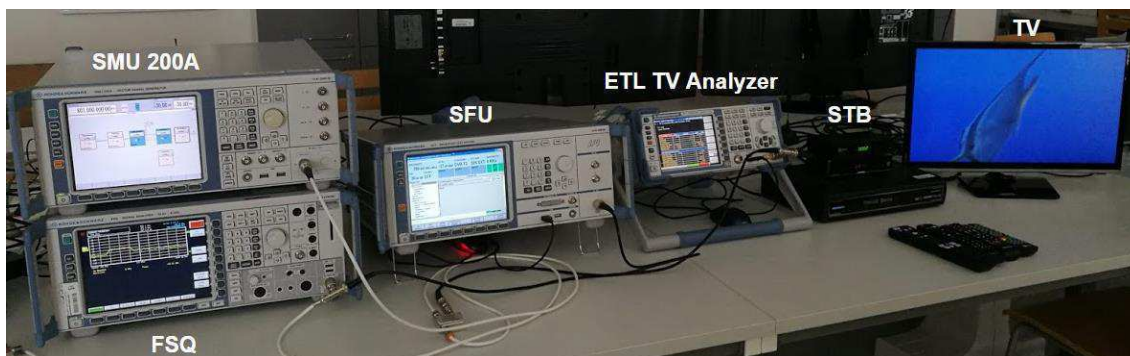
Error Vector Magnitude (EVM)

EVM hodnota udává kvalitu přenášeného modulačního formátu. Je to vektor, který určuje Euklidovskou vzdálenost mezi referenčním modulačním symbolem a symbolem, který je měřen. Tento rozdíl se označuje jako chybový vektor a jeho amplituda se udává v procentech. Kritické hodnoty pro demodulaci jsou 17,5% pro QPSK modulaci, 12,5% pro 16QAM a 8% pro 64QAM. Po překročení těchto hodnot je nemožné dany signál demodulovat [9].

4.3 Použité měřicí přístroje

Společnost R&S dodává testovací zařízení pro generaci a analýzu jak pro mobilní signály, tak pro televizní. Tyto přístroje byly použité z důvodu dostupnosti v laboratořích Digitální Televizní a Rozhlasové Vysílání na Ústavu radioelektroniky (UREL).

Praktické zapojení měřícího pracoviště v laboratoři je zobrazeno a popsáno na Obr. 4.2. Signál z generátoru LTE a DVB-T2 je přiveden na slučovač/rozbočovač, od kterého výstup je veden prvním rozbočovačem (T-Splitter) do FSQ analyzátoru a druhým rozbočovačem do ETL analyzátoru a kaskády STB+TV. V zapojení jsou použité redukce, z tohoto důvodu je potřeba na generátoru nastavit větší vysílací výkon pro kompenzaci útlumu.



Obr. 4.2 Rozložení měřicího pracoviště

SFU Broadcast Test System

Tento přístroj generuje televizní signál (analogový i digitální) na frekvencích od 100 kHz až do 3 GHz. Podporuje vysílání širokého spektra digitálních televizních standardů jako DVB-T/H/T2. Software WinlQSIM2, který řídí tento generátor, umožňuje kompletní vygenerování DVB-T/T2 signálu podle příslušného European Telecommunications Standards Institute (ETSI) standardu [8].

Arbitray Signal Generator SMU 200A with LTE

Je druhý přístroj v blokovém schématu, umožňuje vygenerovat kompletní LTE signál ve frekvenčním rozsahu od 100 kHz do 6 GHz. Je možné zvolit vysílací mód-FDD nebo TDD, požadovanou modulaci, šířku pásma a nastavení vysílaného obsahu.

Power splitter

Slučovač, který usměrňuje signály k příslušným měřicím přístrojům popsaným dále. V měření se používá hybridní slučovač od výrobce TEROZ č. 226 s průchozím útlumem 3,5 až 4 dB pro frekvence od 40 do 860 MHz.

TV Analyzer ETL

Měří objektivní parametry DVB-T2 signálu a poskytuje vysokou přesnost měření. Analyzátor umožňuje demodulovat TV signál a měřit parametry jako BER a MER s kompletní analýzou signálu na PHY vrstvě v reálném čase. Rovněž zobrazuje konstelační diagram.

Signal Analyzer FSQ with LTE modul

Dokáže zobrazit RF spektrum v rozsahu od 500 kHz do 5 GHz, měří základní parametry LTE, jako šířku pásma, výkon signálu a EVM. Umožňuje nastavení měření výkonu v kanále, které se v této práci využívá.

STB a televizní přijímač

Samostatným blokem měření je STB a televizní přijímač, kde STB přijímá vysílaný TV signál ve standardu DVB-T2, zpracovává ho a následně zobrazuje na TV přijímači. Na TV přijímači je možné zobrazený signál subjektivně ohodnotit a posoudit vliv daného koexistenčního scénáře na kvalitu TV signálu. Propojení mezi STB a TV je realizováno HDMI kabelem. V měření se používají následující 3 STB. Během měření byla zjištěná značná teplotní závislost (po zahřátí zlepšení odolnosti vůči rušení až 4 dB) u STB Emos a Thomson.

1. Emos EM180 HD
Umí přijímat současně digitální vysílání DVB-T i DVB-T2. Podporuje obrazové formáty H.264 i H.265 (HEVC), Full HD kvalita. Konektory SCART, HDMI, USB 2.0, IEC. Frekvenční rozsah 177-858 MHz. Vstupní úroveň signálu -70 dBm až 10 dBm.
2. Thomson THT712
Obsahuje stejné konektory jako Emos, ale navíc má ještě Ethernet (LAN) přípojku. Také nabízí uložení videa na pevný disk přes rozhraní USB.
3. IceCrypt STC6000HD PVR
Na rozdíl od předchozích STB nabízí Twin Tuner – vyskytují se zde dva výměnné HDTV tunery, má větší počet konektorů a je podstatně větší rozměrově.



Obr. 4.3 Použité Set-Top-Boxy v měření

4.4 Způsob vyhodnocování

Pro vyhodnocování odolnosti DVB-T2 signálu vůči rušícímu LTE se používá již zmíněný parametr (C/I), kde C je úroveň signálu na vstupu DVB-T2 přijímače. V měření je použito $C = -60$ dBm [15] vypočítaný podle rovnice (1). Parametr I je úroveň rušícího signálu LTE. Ten je na začátku měření nastaven na -90 dBm a postupně se zvyšuje až do úrovně, dokud TV signál nevypadne. Měří se tedy hodnota I těsně před vypadnutím TV signálu. Poměr C/I se pak vypočte jako C/I [dB] = C [dBm] – I [dBm], kde

$$C = 10\log(kTB_{TV}) + C/N + NF + 30 \quad (1)$$

kde k je Boltzmannova konstanta ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$), T je teplota (290 K), B_{TV} je šířka pásma DVB-T2 kanálu (8 MHz), C/N vyjadřuje velikost odstupe užitelného nosného signálu od šumu (30 dB)-tato hodnota je konstantní během celého měření, NF je šumové číslo (7 dB).

Ochranné pásmo mezi signály DVB-T2 a LTE se vždy nastaví na 1 MHz. Během měření se průběžně mění šířka pásma LTE (B_{LTE}) od 1,4 MHz do 20 MHz. Provozní mód LTE je nastaven na FDD a způsob vysílání na Downlink. Vždy je nastaven maximální počet zdrojových bloků (Resource Block-RB), podle velikosti IFFT. Kódový poměr nastaven na 1/3 (Turbo). Všechny parametry jsou přehledně zobrazené v Tab. 5.1.4.

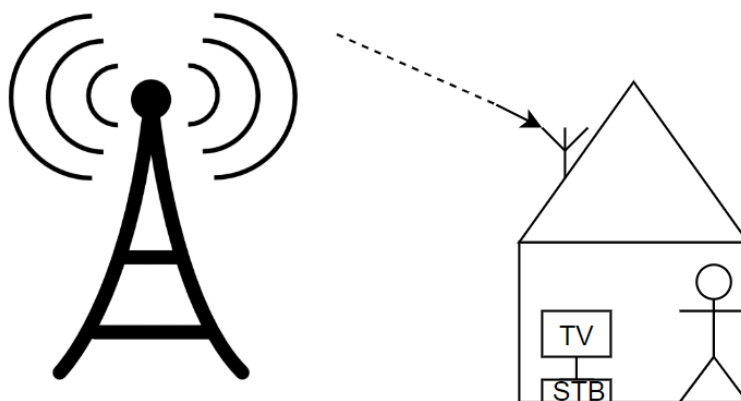
5 MĚŘENÍ KOEXISTENČNÍCH SCÉNÁŘŮ

5.1 Představení jednotlivých scénářů

V této bakalářské práci je prezentováno několik změřených scénářů DVB-T2, které byly zvoleny po konzultaci s vedoucím podle [19]. V každém scénáři se experimentálně mění více parametrů. Lze tedy pomocí získaných výsledku lépe charakterizovat odolnost systému DVB-T2 vůči rušení signálem LTE. Každý scénář je následně stručně popsán.

5.1.1 Scénář č. 1

Tento scénář je zvolen jako doporučená konfigurace pro vysílání v České republice, kterému předcházely měření ČTÚ. Předpokládá se fixní příjem na střeše, proto je možné použít náročnější modulaci 256QAM a FFT mód 32K-Extended. Umožňuje vysoký datový přenos (až 33.4 Mbit/s). Odolný kódový poměr 2/3 zaručuje dostatečnou bezpečnost přenášených dat proti rušení v poměru ke zvýšené redundanci. Určený pro příjem v celostátní Single Frequency Network (SFN) [20].



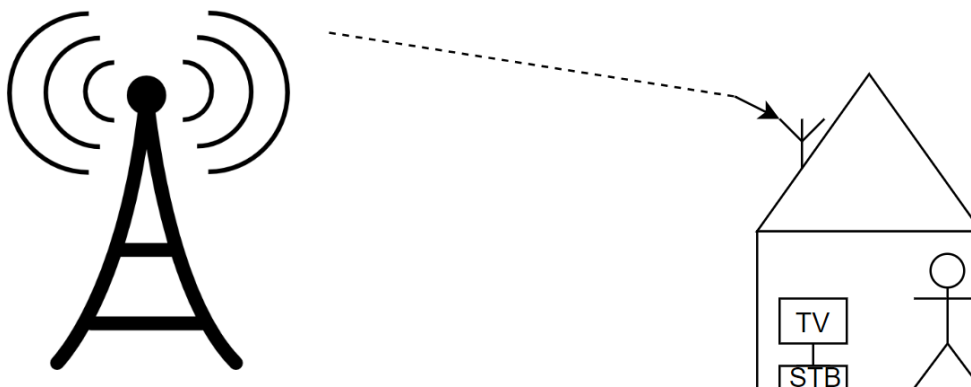
Obr. 5.1 Ilustrační zobrazení prvního scénáře

Tab. 5.1 Systémové parametry prvního scénáře

	DVB-T2
Kmitočtové pásmo	8 MHz
FFT	32K-Extended
Pilot Pattern (PP)	PP2
Ochranný interval	1/8
Modulace	256QAM
Kódový poměr	2/3

5.1.2 Scénář č. 2

Znovu se uvažuje stabilní příjem na střeše. Na rozdíl od předchozího scénáře tento scénář je určený pro maximální pokrytí sítí SFN na úkor přenosové rychlosti. Z toho důvodu je použita robustnější modulace 16QAM, která lépe odolává rušení, které zeslabuje signál na velkých vzdálenostech. Vzhledem k relativně vysoké robustnosti nastavení je možné snížit ochranný interval na 1/16 (224 μ s) pro velmi velké SFN. Výsledný datový přenos je 16.7 Mbit/s [19].



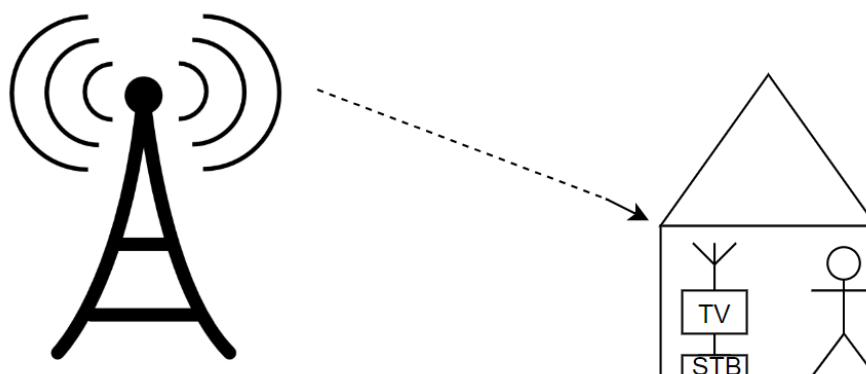
Obr. 5.2 Ilustrační zobrazení druhého scénáře

Tab. 5.2 Systémové parametry druhého scénáře

	DVB-T2
Kmitočtové pásmo	8 MHz
FFT	32K-Extended
Pilot Pattern (PP)	PP2
Ochranný interval	1/8
Modulace	16QAM
Kódový poměr	2/3

5.1.3 Scénář č. 3

Scénář č. 3 popisuje sadu parametrů pro přenosný příjem (tzv portable reception). Z tohoto důvodu je změněn FFT mód na 16K-Extended, který lépe vyhodnocuje Dopplerův posuv. Parametry jsou přizpůsobeny současným implementacím Digital Terrestrial Television (DTT) založeným na DVB-T v Německu. Zvolené parametry umožňují velikost SFN s průměrem až 150 km. Výsledný datový přenos je 26.2 Mbit/s [19].



Obr. 5.3 Ilustrační zobrazení třetího scénáře

Tab. 5.3 Systémové parametry třetího scénáře

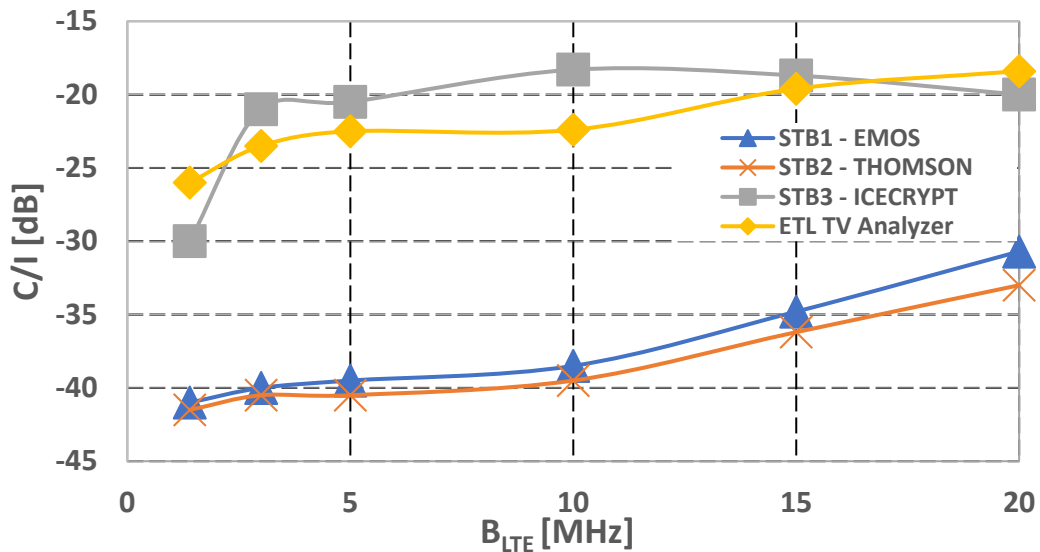
	DVB-T2
Kmitočtové pásmo	8 MHz
FFT	16K-Extended
Pilot Pattern (PP)	PP3
Ochranný interval	1/8
Modulace	64QAM
Kódový poměr	2/3

5.1.4 Nastavení LTE

Tab. 5.4 Nastavení systémových parametrů LTE

Kódový poměr	1/3 (Turbo)
Modulace subramce	QPSK
Šířka pásma (B_{LTE})	1,4 MHz
	3 MHz
	5 MHz
	10 MHz
	15 MHz
	20 MHz
Velikost IFFT	128
	256
	512
	1024
	1536
	2048
Provozní mód	FDD
Ochranný interval	4,7 μ s

5.2 Výsledky měření prvního scénáře



Obr. 5.4 Závislost parametru C/I na parametru B_{LTE} při původním nastavení prvního scénáře

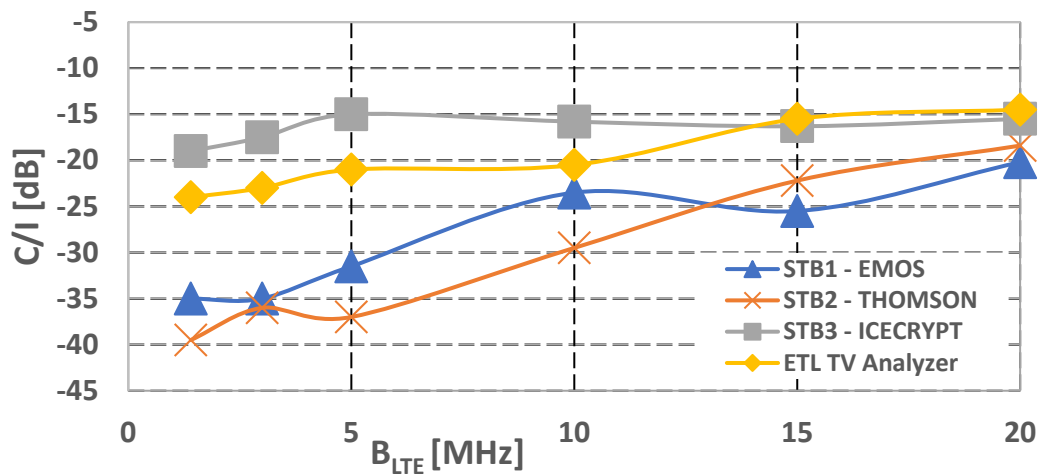
Z prvního scénáře, který se uvažuje v České republice můžeme vyčíst několik očekávaných charakteristik, které se v podstatné míře uplatňují i v ostatních měřeních. První je postupné zvyšování parametru C/I vzhledem k šířce pásma LTE signálu. Tato zhoršená odolnost signálu vůči většímu B_{LTE} pramení ze skutečnosti, že ochranné pásmo 1 MHz zanikne rychleji a dojde tudíž k částečnému překrytí obou signálů. Závisí také na míře potlačení bočních laloků, které jsou výraznější u větších šířek pásma LTE. Druhá charakteristika, která se v jisté míře uplatňuje i v ostatních měřeních, se týká STB, kde novější a zároveň menší a levnější modely (Emos EM180 HD a Thomson THT712) jsou mnohem odolnější a umožňují lepší stabilní příjem DVB-T2, než IceCrypt STC6000HD PVR.

Tento graf bude fungovat jako referenční vůči ostatním změnám v tomto scénáři. Jedná se o modulaci 256QAM, dá se tedy očekávat, že signál bude citlivější na rušení než ostatní robustnější modulační schémata. Při všech hodnotách B_{LTE} nejsou patrné žádné výrazné změny mezi STB Emos a Thomson, Thomson je průměrně o 1,5 dB více odolný na rušení způsobené signálem LTE. Oba zmíněné STB mají 20 dB lepší robustnost při dekódování než IceCrypt. IceCrypt pouze na nejnižší šířce pásma LTE (1,4 MHz) prokazuje zvýšenou odolnost (o 10 dB) než na ostatních šířkách pásma. Jako nejlepší STB pro tento scénář se jeví Thomson, který dokázal poskytnout nejstabilnější příjem z dostupných STB pro všechny šířky pásma LTE.

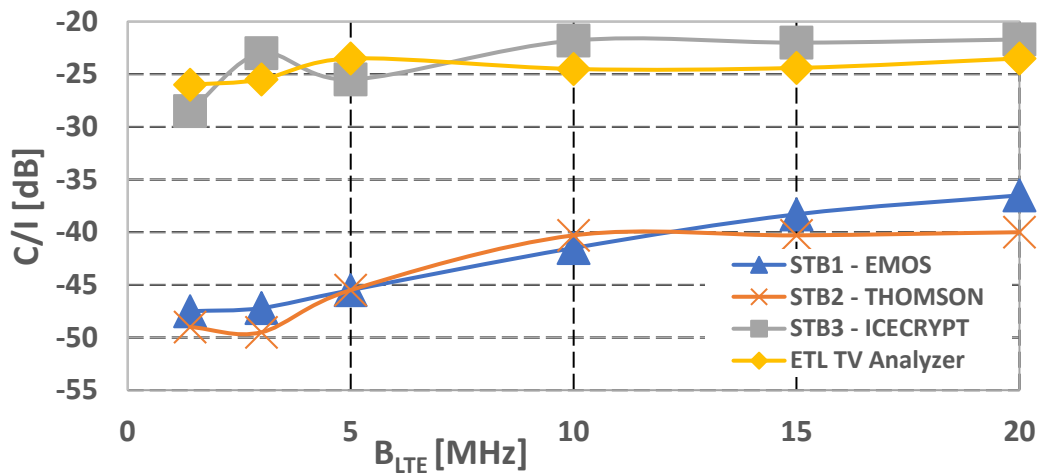
Tab. 5.5 Experimentální změny v modulaci LTE pro první scénář.

B_{LTE} [MHz]	Vnitřní modulace: QPSK			
	STB1 - EMOS	STB2 - THOMSON	STB3 - ICECRYPT	ETL TV Analyzer
	C/I [dB]	C/I [dB]	C/I [dB]	C/I [dB]
1,4	-41	-41,5	-30	-26
3	-40	-40,5	-21	-23,5
5	-39,5	-40,5	-20,5	-22,5
10	-38,5	-39,5	-18,3	-22,4
15	-34,8	-36,2	-18,7	-19,6
20	-30,7	-33	-20	-18,4
	Vnitřní modulace: QPSK, 16QAM, 64QAM			
1,4	-45	-44,5	-38	-25
3	-44,5	-45	-29,5	-23,5
5	-43,3	-43,1	-19,5	-21,7
10	-41	-42,2	-17,5	-23,5
15	-37,5	-39,3	-19,9	-23,6
20	-34,3	-37	-20,9	-23,5

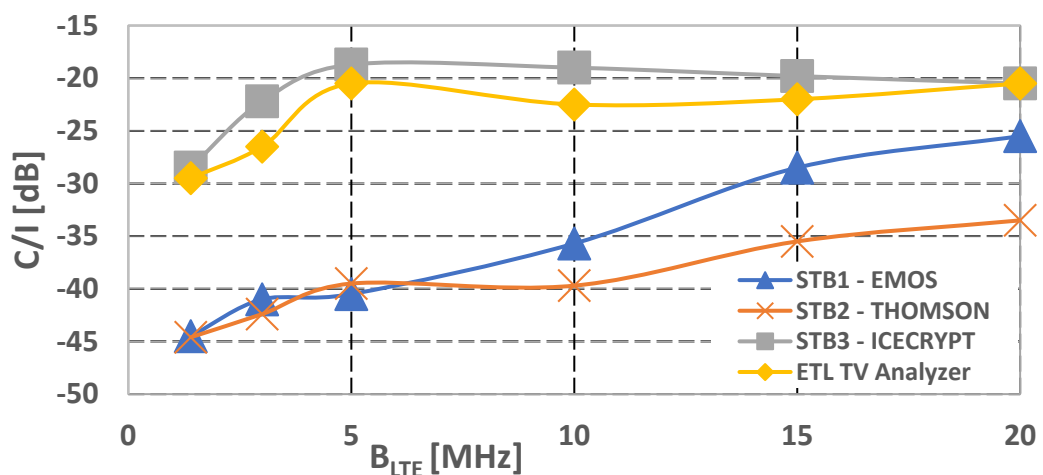
V Tab. 5.5 jsou zobrazené změřené údaje pro 2 různé vnitřní modulace LTE. Cílem je porovnání vlivu různých vnitřních modulací rušícího signálu na vysílání DVB-T2. V první části jsou zobrazené hodnoty parametru C/I z Obr. 5.4, v tomto případě se vysílají data v jednotné QPSK modulaci. Druhá část tabulky obsahuje data z měření, kde se opakovaně střídaly modulace zdrojových bloků (resource blocks) QPSK, 16QAM a 64QAM. Ze změřených hodnot je zřejmé, že měnící se se modulace zdrojových bloků signálu LTE potřebuje menší úroveň výkonu aby způsobila výpadek vysílání DVB-T2. Pro Emos a Thomson dochází k výpadku vysílání o 2-4 dB rychleji napříč celým spektrem B_{LTE} . Největší rozdíl pro oba STB je na $B_{LTE}=3$ MHz, odchylka činí 4,5 dB. Rušení větší šířkou LTE (5-20 MHz) nemá přímý vliv na STB IceCrypt (rozdíl je minoritní) při nejnižších šířkách pásma LTE je zde rozdíl až 8,5 dB. ETL vykazuje podobné rozdíly v robustnosti jako zmíněně první dva STB (Emos a Thomson). ETL na nižších šířkách pásma LTE (1,4-10 MHz) se příliš nemění (<1 dB), při $B_{LTE}=20$ MHz je největší rozdíl v odolnosti (5,1 dB).



Obr. 5.5 Závislost parametru C/I na parametru B_{LTE} u prvního scénáře při změně kódového poměru na 4/5



Obr. 5.6 Závislost parametru C/I na parametru B_{LTE} u prvního scénáře při změně modulace 64QAM

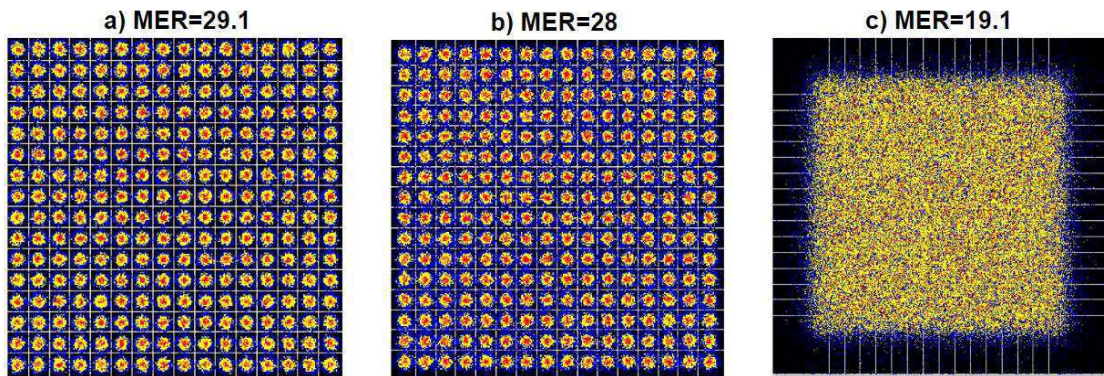


Obr. 5.7 Závislost parametru C/I na parametru B_{LTE} u prvního scénáře při změně modulace na 64QAM a CR=4/5

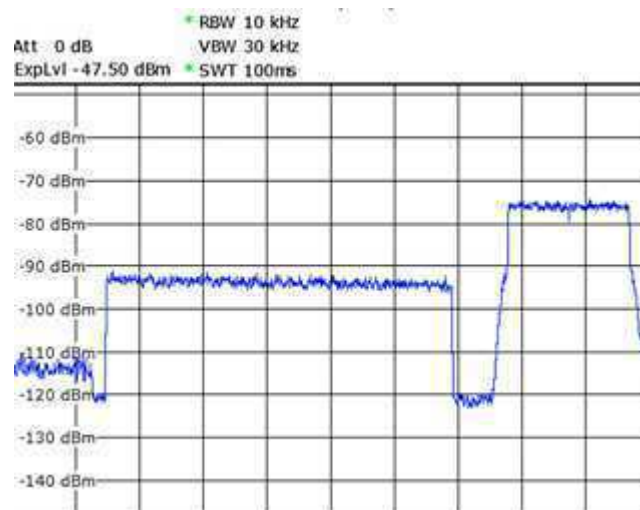
Změna kódového poměru z 2/3 na méně odolné 4/5 na Obr. 5.5 způsobila předvídaný celkový pokles robustnosti systému DVB-T2. Toto zeslabení odolnosti signálu DVB-T2 činilo průměrně 5 dB při hodnotách B_{LTE} 1,4-5 MHz (STB Emos a Thomson). Pro IceCrypt tato odchylka 5 dB platila pro celý rozsah rušení. Při větších šířkách LTE (>5 MHz) docházelo k ještě znatelnější diferencí u STB Emos a Thomson, a to 10 dB proti referenčnímu měření. Na rozdíl od Obr. 5.4, kde STB Emos a Thomson měly téměř shodné průběhy, u méně bezpečného kódového poměru je mají značně odlišné. Kdy jejich odolnosti vůči rušení se vzájemně liší v průměru o 3,5 dB. U 20 MHz se všechny STB přibližují stejné hodnotě -17 dB. Toto nastavení kvůli zvolené modulaci 256QAM a kódovému poměru 4/5 je nejméně odolné v celém prvním scénáři. Výhoda této změny kódového poměru oproti referenčnímu měření je ve větší přenosové rychlosti.

Obr. 5.6 prezentuje experimentální změnu modulace na 64QAM. Snížila se rychlost přenosu dat, ale podstatně se zvýšila odolnost signálu. Méně stavová modulace vylepšila odolnost vůči interferencím způsobené LTE signálem. V porovnání s referenčním měřením je tato změna robustnosti signálu zhruba 7 dB pro STB Emos a Thomson. Průběh STB IceCrypt se příliš nezměnil, v celém rozsahu šířky pásma LTE se odolnost zlepšila o 2 dB. STB Thomson má u $B_{LTE}=15$ a 20 MHz o 2 dB lepší odolnost než Emos. Celkově tvar křivek měřících přístrojů odpovídá Obr. 5.3, kde STB Emos a Thomson mají velmi podobné průběhy.

Na Obr. 5.7 se kromě robustnější modulace 64QAM zvolil ještě pozměněný kódový poměr na 4/5. Na první pohled je patrná zhoršená odolnost vůči rušení u STB Emos, který se od 5 MHz vzdaluje od křivky STB Thomson. Tyto výsledky se více podobají Obr. 5.5 kde se také změnil kódový poměr na 4/5. Lze si z toho vyvodit, že hlavně STB Emos a Thomson jsou značně závislé na poměru CR. Pro Emos zlepšení odolnosti proti referenčnímu měření odpovídá průměrně 4 dB. Thomson se pouze u $B_{LTE}=1,4$ MHz zlepšil v robustnosti (3 dB), pro ostatní šířky pásma LTE byly změny pod 1 dB. IceCrypt reaguje na tuto experimentální změnu parametrů obdobným způsobem jako na referenčním měření. ETL má zhruba o 4 dB lepší odolnost než na Obr. 5.4.



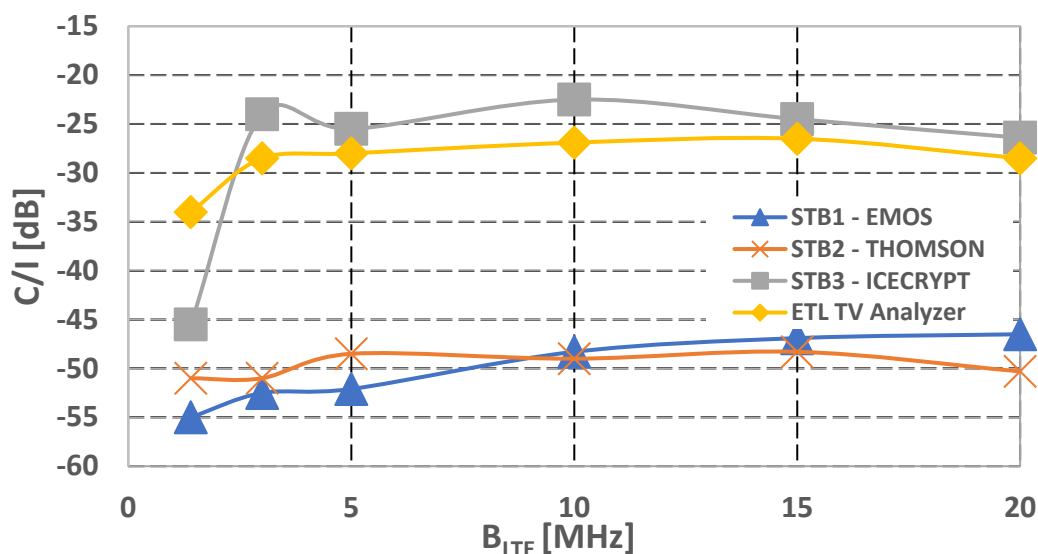
Obr. 5.8 Konstelační diagramy pro modulaci 256QAM, $B_{LTE}=20$ MHz a) Samotný signál DVB-T2 bez rušení b) Shodné výkonové úrovně DVB-T2 a LTE (-60 dBm) s 1 MHz GB c) Překročení tzv. QEF hranice



Obr. 5.9 RF spektrum DVB-T2 a LTE ($B_{LTE}=3$ MHz), GB=1 MHz, Center=787 MHz, Span=14 MHz

Zde jsou zobrazené konstelační diagramy modulace 256QAM pro různé hodnoty rušení signálu LTE. Je patrné, že i při slabém rušení signálem LTE (Obr. 5.8 b)) je v konstelačním diagramu patrné rušení i přes 1 MHz ochranné pásmo. V části c) diagram zobrazuje spektrum po překročení stanovené hranice pro maximální stabilní příjem, nelze z něj rozpoznat jednotlivé stavy. Obr. 5.9 zobrazuje změřené spektrum s rušícím signálem LTE s šířkou pásma 3 MHz a GB 1 MHz.

5.3 Výsledky měření druhého scénáře



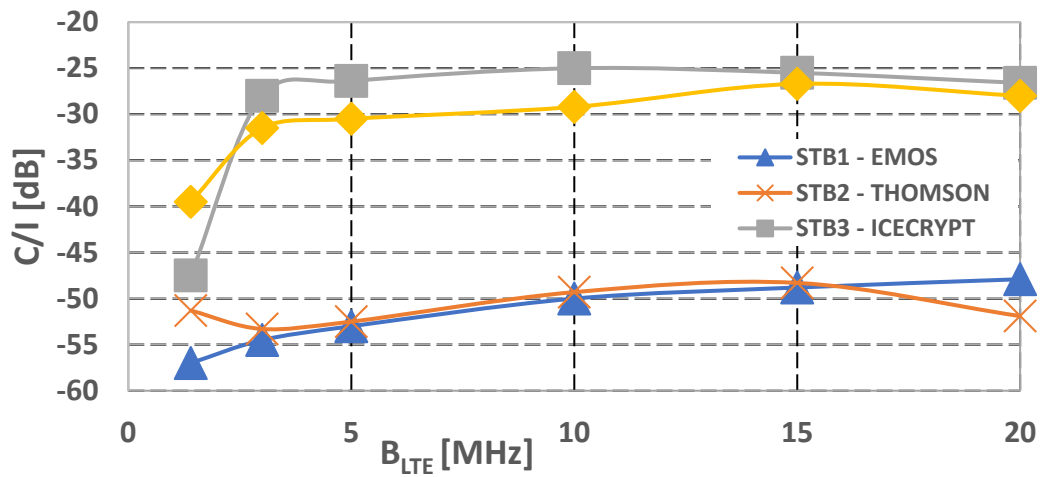
Obr. 5.10 Závislost parametru C/I na parametru B_{LTE} při původním nastavení druhého scénáře

Tento scénář bude znovu sloužit jako referenční. Jedná se o modulaci 16QAM, která reprezentuje nejnižší M-stavovou vnitřní modulaci pro vysílání TV signálu DVB-T2. Díky své robustnosti se využívá převážně na velké vzdálenosti vysílání. Pro IceCrypt zde znovu platí, že se jeho odolnost mění pouze minimálně v závislosti na B_{LTE} , pohybuje se v blízkosti $C/I = -23$ dB. ETL má průměrně o 2 dB lepší robustnost jak IceCrypt. Při tomto scénáři není patrné zhoršování odolnosti se zvětšováním B_{LTE} , jak tomu bylo v ostatních měřeních u STB Thomson. Dochází zde k vzájemnému přiblížení odolností u největší a nejmenší B_{LTE} . Je nutné podotknout že zmíněné nastavení je velmi robustné a výkon LTE, který je nutné vygenerovat, aby došlo k rušení DVB-T2 je značný. V porovnání s prvním scénářem (Obr. 5.4), kde modulace je 256QAM je zlepšení odolnosti signálu v průměru o 12 dB pro STB Emos a 11 dB pro Thomson. U IceCryptu se zlepšila odolnost pouze o 4 dB.

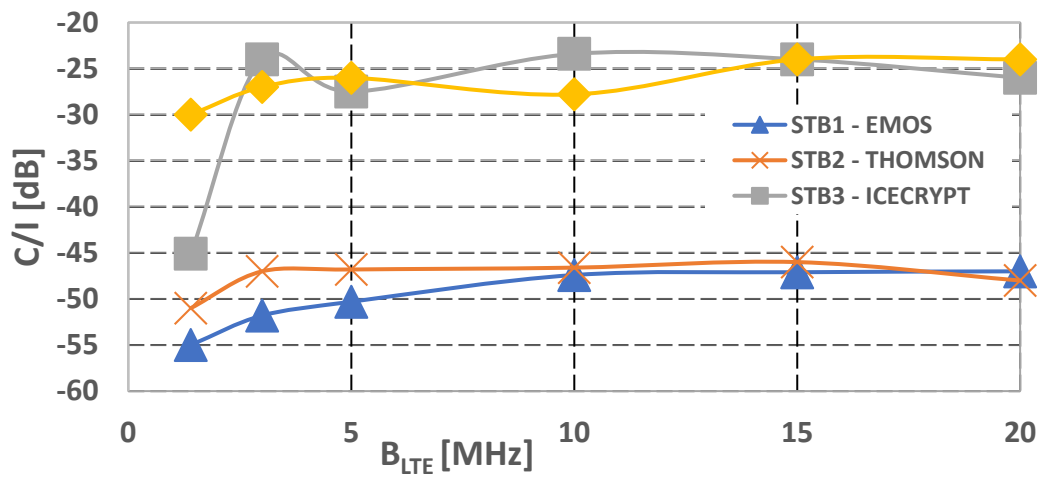
Tab. 5.6 Experimentální změny v modulaci LTE pro druhý scénář.

B_{LTE} [MHz]	Vnitřní modulace: QPSK			
	STB1 - EMOS	STB2 - THOMSON	STB3 - ICECRYPT	ETL TV Analyzer
	C/I [dB]	C/I [dB]	C/I [dB]	C/I [dB]
1,4	-55	-51	-45,5	-34
3	-52,5	-51	-24	-28,5
5	-52,1	-48,5	-25,5	-28
10	-48,3	-49	-22,5	-26,9
15	-46,9	-48,3	-24,5	-26,5
20	-46,5	-50,3	-26,4	-28,5
	Vnitřní modulace: 16QAM			
1,4	-60	-60	-47	-27
3	-60	-60	-20	-24,5
5	-60	-60	-21	-23,5
10	-46,5	-47	-20	-24
15	-47,9	-48,5	-21,7	-27
20	-47,5	-48,5	-22	-27

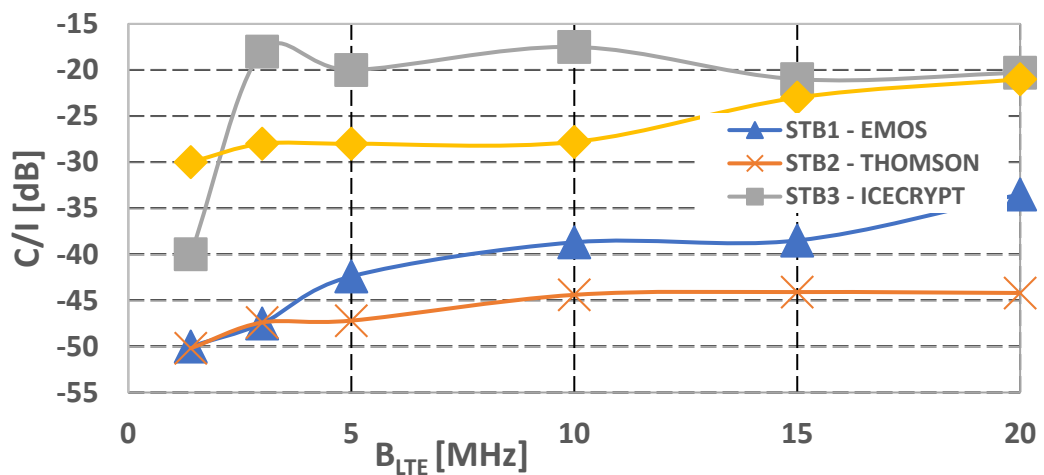
V předchozím scénáři bylo potvrzeno, že změna vnitřní modulace LTE má vliv na odolnost DVB-T2 při stále se opakujícím cyklu modulací QPSK, 16QAM a 64QAM. V Tab. 5.6 jsou zkoumané rozdíly při změně modulace z QPSK na 16QAM (větší datový tok). Z tabulky je patrné, že pro STB Emos a Thomson se hodnoty parametru C/I rovnají hodnotě -60 dB pro $B_{LTE}=1,4-5$ MHz. Tato skutečnost je způsobena použitím modulace, která využívá dvojnásobný počet bitů (než QPSK) pro určení výsledného stavu, tedy větší složitost pro vygenerování přístrojem SMU 200A. Limity výkonu, které jsou stanovené na generátoru LTE (aby nedošlo k poškození generátoru) neumožňovaly vytvoření takového rušícího signálu o potřebné výkonové úrovni aby došlo k výpadku DVB-T2. Z ostatních hodnot je patrné, že tato modulace podle teoretického předpokladu způsobuje větší rušení než QPSK. Pro STB Emos a Thomson je tento rozdíl menší a to 1-2 dB. IceCrypt je citlivější na změnu vnitřní modulace než zmíněné 2 STB a rozdíl činí od 2 do 4 dB (větší rozdíl při větší hodnotě B_{LTE}). Analyzátor ETL je převážně na $B_{LTE}=1,4$ až 10 MHz méně odolný proti rušení LTE, kde je změna oproti vnitřní modulaci QPSK 3-6 dB.



Obr. 5.11 Závislost parametru C/I na parametru B_{LTE} u druhého scénáře při rotované konstelaci



Obr. 5.12 Závislost parametru C/I na parametru B_{LTE} u druhého scénáře při změně ochranného intervalu na 1/16

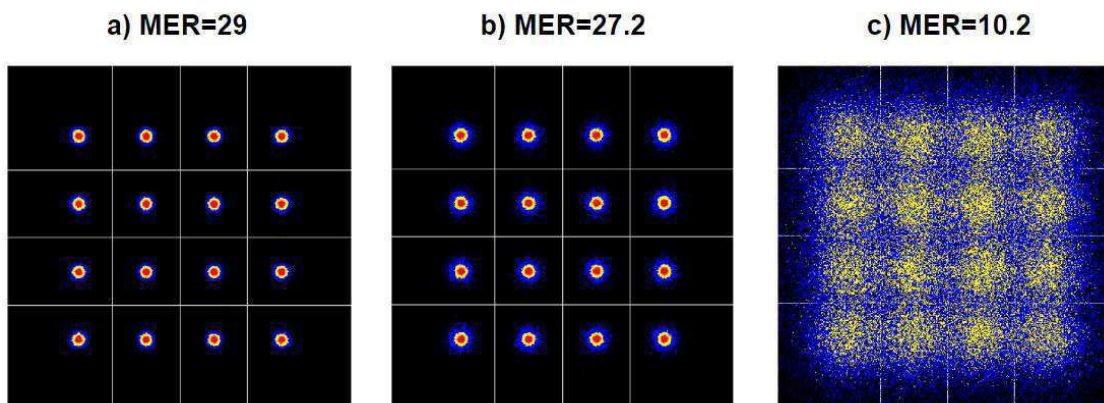


Obr. 5.13 Závislost parametru C/I na parametru B_{LTE} u druhého scénáře při změně kódového poměru na 4/5

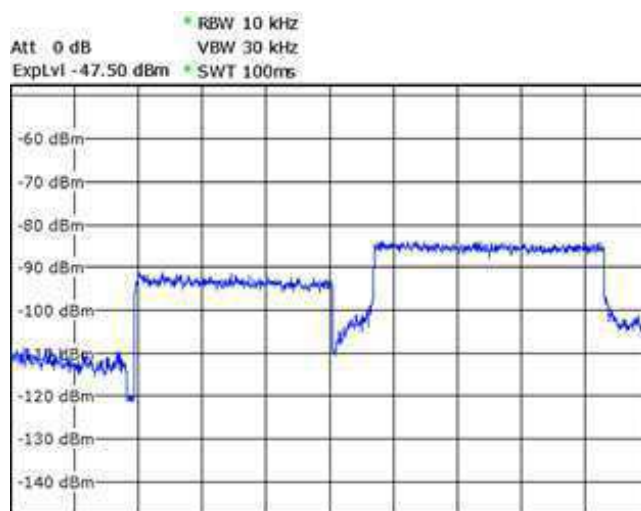
Na Obr. 5.11 byl pozměněn parametr rotované konstelace v nastavení vysílání DVB-T2. Podle [21] by rotace konstelačního diagramu měla zlepšit příjem při velkém rušení v kanálu. Zlepšení příjmu je patrné pouze na středních hodnotách B_{LTE} (3 až 10 MHz) o 2 dB. Při ostatních šířkách pásma LTE se hodnoty pohybují v rozmezí max $\pm 0,6$ dB od referenčního scénáře (STB Emos a Thomson). U STB Thomson si lze všimnout větší odolnosti při $B_{LTE}=15$ MHz, která se rovná -48,3 dB, je stejná jako v referenčním scénáři. STB Thomson má podobný průběh charakteristiky jako v referenčním grafu, kde má podstatně zvýšenou odolnost na širokopásmové rušení, než na úzkopásmové.

V Obr. 5.12 byla zmenšená doba ochranného intervalu z $1/8$ (448 μ s) na $1/16$ (224 μ s), tímto snížením GI došlo k zvětšení datového toku. Tato změna GI byla již zmíněná v popisu tohoto scénáře na začátku kapitoly. Lze si povšimnout že změna tohoto parametru nemá značný vliv na odolnost vysílání DVB-T2 proti rušení LTE. Délka ochranného intervalu hraje větší roli v sítích SFN a také v oblastech kde dochází k větším odrazům a zpoždění signálu. STB Emos a IceCrypt prezentují minimální výkyvy odolnosti vůči referenčnímu měření (<1 dB) pro různé hodnoty B_{LTE} . Více závislý na ochranném intervalu je STB Thomson. Zde dochází ke zhoršení odolnosti o 2-3 dB pro B_{LTE} od 3 do 20 MHz. U ETL došlo ke zhoršení odolnosti o 5 dB ve hraničních šířkách pásma (1,4 a 20 MHz).

V Obr. 5.13 byl změněn kódový poměr z $2/3$ na $4/5$. V této práci je to po třetí, co se u různých modulací měnil tento parametr. Máme tedy dostatek informací pro zhodnocení jak kódový poměr, při příslušné modulaci, mění odolnost proti rušení LTE. Pro toto porovnání je vybrán Thomson, který se jeví jako STB s nejlepší odolností. Bude se uvažovat $B_{LTE}=20$ MHz, tato šířka LTE se v praxi nejčastěji používá a představuje dosavadní největší rozdíly v parametru C/I . Při modulaci 256QAM, se parametr C/I zvětšil o 14 dB. Pro modulaci 64QAM, změna kódového poměru na $4/5$ zapříčinila zhoršení odolnosti o 6,5 dB. Modulace 16QAM, rozdíl mezi odlišnými kódovými poměry činí 6,1 dB. Teoretický předpoklad se potvrdil, kdy u modulace, která mapuje více bitů na symbol, má větší datový přenos a tím pádem větší citlivosti na rušení v kanálu a je více závislá na zabezpečení v podobě kódového poměru. U modulace 64QAM a 16 QAM je rozdíl méně znatelný, kde samotná modulace je dostatečně robustná a nedochází k takovým výchytkám při snížení kvality kódování. STB Emos reaguje na zhoršení kódového poměru obdobně jako v Obr. 5.7, kdy dochází ke degradaci odolnosti průměrně o 11 dB vůči původnímu měření. IceCrypt snížil svou odolnost o 6 dB v celém rozsahu. Odolnost u ETL se průměrně zhoršila o 2 dB vůči referenčnímu měření.



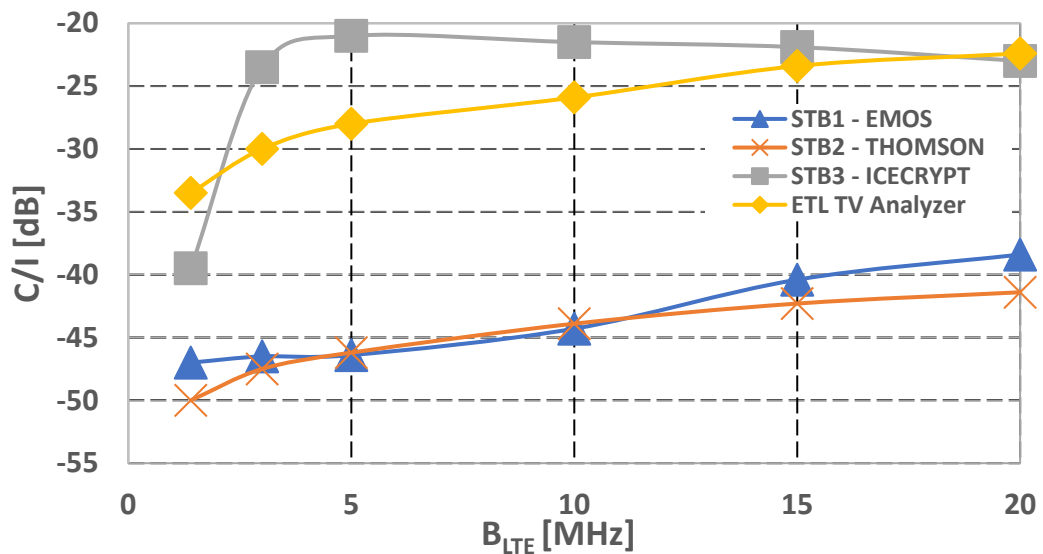
Obr. 5.14 Konstelační diagramy pro modulaci 16QAM, $B_{LTE}=20$ MHz a) Samotný signál DVB-T2 bez rušení b) Shodné výkonové úrovně DVB-T2 a LTE (-60 dBm) s 1 MHz GB c) Překročení QEF hranice



Obr. 5.15 RF spektrum DVB-T2 a LTE ($B_{LTE}=10$ MHz), GB=1 MHz, Center=789 MHz, Span=25 MHz

Zde jsou zobrazené konstelační diagramy modulace 16QAM pro různé hodnoty rušení signálu LTE. Díky menšímu počtu bitů (než v Obr. 5.8) si lze všimnout podstatně větší odolnosti v části b), kde nedochází k rušení na hranici rozpoznatelnosti jednotlivých stavů při stejné úrovni LTE a DVB-T2. Obr. 5.15 zobrazuje rozložení RF spektra na přístroji ETL, šířka pásma LTE je 10 MHz.

5.4 Výsledky měření třetího scénáře



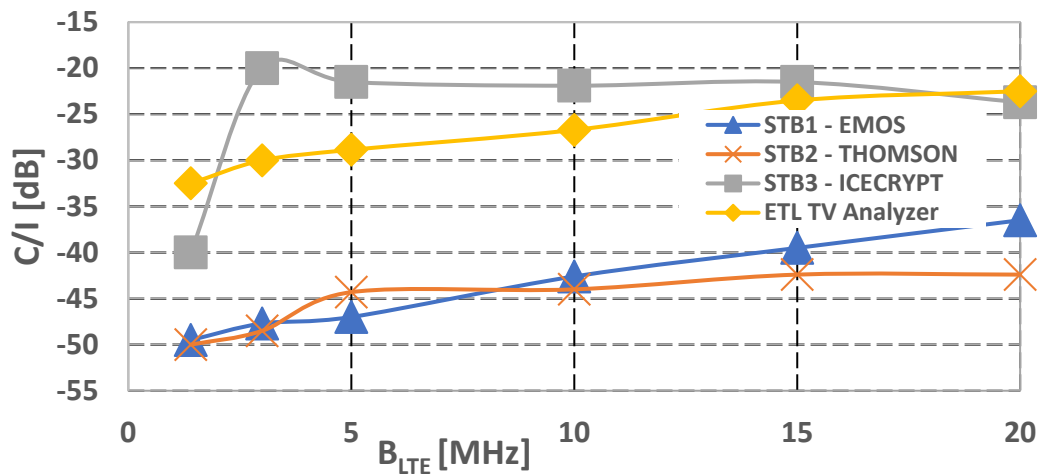
Obr. 5.16 Závislost parametru C/I na parametru B_{LTE} při původním nastavení třetího scénáře

V tomto scénáři je poprvé změněn FFT mód z 32K-Extended na 16K-Extended. Oba tyto nejvyšší módy nosné zlepšují datový tok v SFN sítích a také mají lepší odolnost proti impulsnímu rušení v kanále. Nicméně velký počet FFT bodů zvětšuje požadavky na paměť a optimalizaci [22]. V tomto scénáři by nemělo docházet k zásadním změnám v porovnání s Obr. 5.6, kde byl pouze změněn mód 32K-Extended, ostatní nastavení je shodné. STB Emos se průměrně zlepšil v odolnosti proti rušení LTE o 2-3 dB. Stejně zlepši platí i pro STB Thomson. IceCrypt neprojevuje změny v odolnosti, které by byly větší jak 1 dB. U ETL od 1,4 MHz do 10 MHz šířky pásma LTE došlo ke zlepšení odolnosti o 8 dB u $B_{LTE}=10$ MHz o 3 dB.

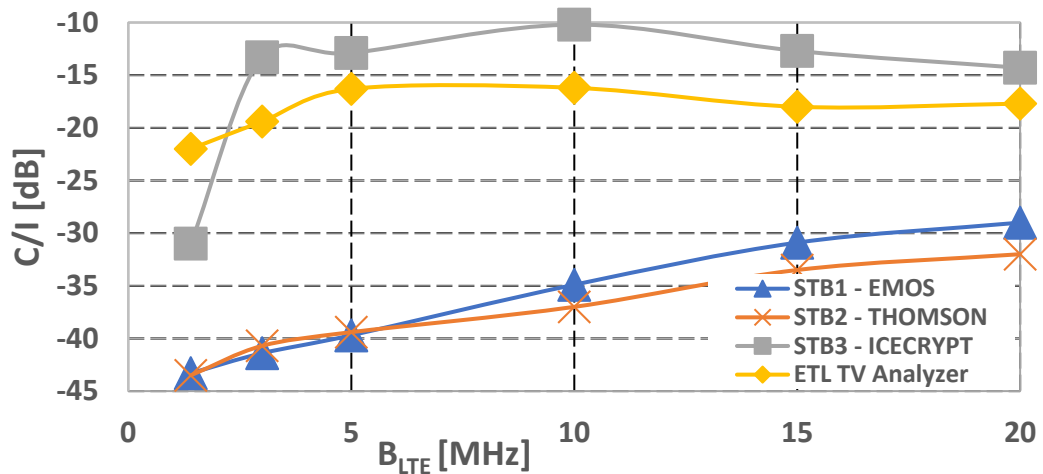
Tab. 5.7 Experimentální změny v modulaci LTE pro třetí scénář.

B_{LTE} [MHz]	Vnitřní modulace: QPSK			
	STB1 - EMOS	STB2 - THOMSON	STB3 - ICECRYPT	ETL TV Analyzer
	C/I [dB]	C/I [dB]	C/I [dB]	C/I [dB]
1,4	-47	-50	-39,5	-33,5
3	-46,5	-47,5	-23,5	-30
5	-46,4	-46,2	-21	-28
10	-42,5	-43,9	-21,5	-25,9
15	-40,4	-42,3	-21,9	-23,4
20	-38,4	-41,4	-23	-22,4
	Vnitřní modulace QPSK, 16QAM, 64QAM			
1,4	-50	-51	-43,5	-26,5
3	-48,3	-48,5	-37,3	-24,3
5	-47,4	-48,3	-21	-23,5
10	-45	-44,4	-18,7	-23,5
15	-43,5	-45,3	-21,2	-26,3
20	-42,5	-45,5	-21,8	-26,5

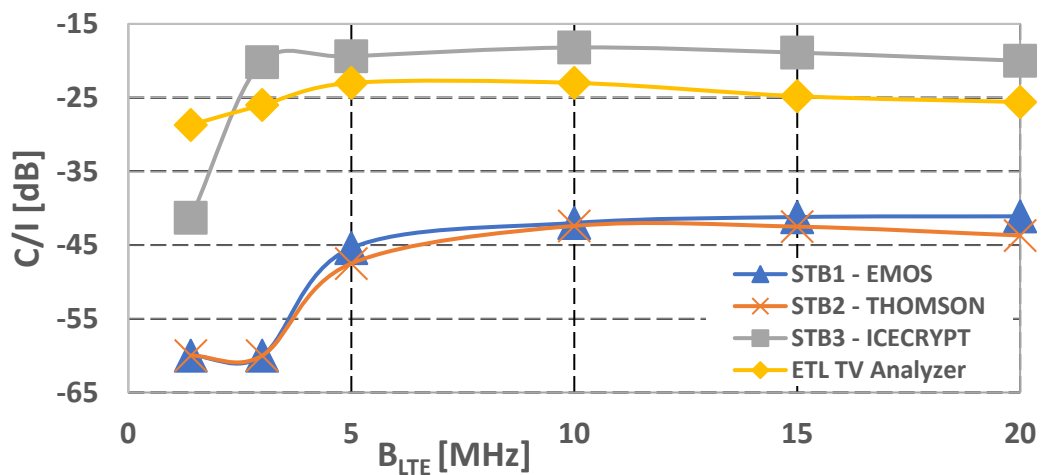
V Tab. 5.7 se opět experimentálně měnila vnitřní modulace zdrojových bloků na opakující se soustavu QPSK, 16QAM a 64QAM. Tato soustava byla znovu zvolena po přezkoumání výsledků, které byly získané z Tab. 5.6, kde na nižších B_{LTE} nebylo možné vygenerovat výkon dostatečně silný, aby způsobil výpadek velmi robustního nastavení DVB-T2. Průměrné zhoršení v odolnosti pro Emos a Thomson se pohybuje v rozmezí 2-3 dB, pro $B_{LTE}=20$ MHz je rozdíl pro oba přístroje 4,1 dB. STB IceCrypt se znatelně mění při nižších šířkách pásma LTE (1,4 a 3 MHz), rozdíl proti QPSK vnitřní modulaci činí 4 a 14 dB. Toto znatelné zeslabení v odolnosti se vyskytlo i v Tab. 5.5, kde ale rozdíl činil 8 dB pro obě B_{LTE} . Analyzátor ETL vykazuje očekávanou zhoršenou odolnost proti rušení při $B_{LTE}=1,4$ až 10 MHz průměrně o 4 dB.



Obr. 5.17 Závislost parametru C/I na parametru B_{LTE} u třetího scénáře při změně ochranného intervalu na 1/16 a Pilot Pattern na PP8



Obr. 5.18 Závislost parametru C/I na parametru B_{LTE} třetího scénáře při změně modulace na 256QAM

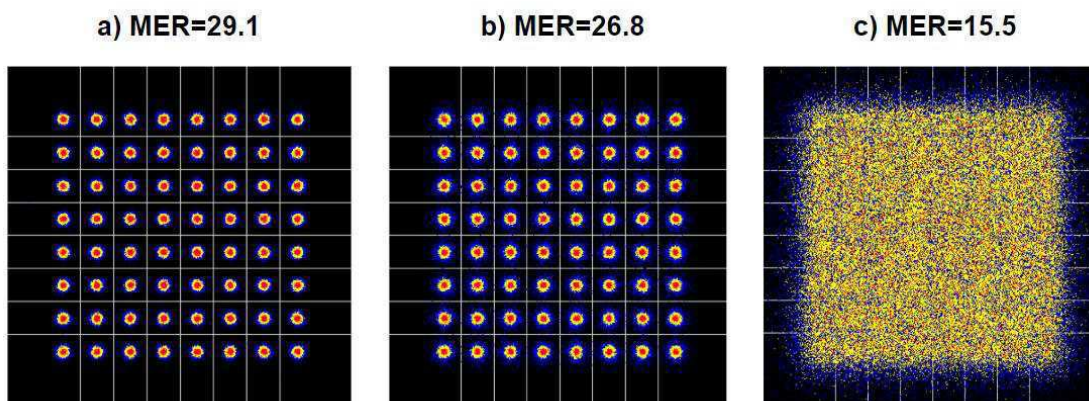


Obr. 5.19 Závislost parametru C/I na parametru B_{LTE} třetího scénáře při změně kódového poměru na 1/2

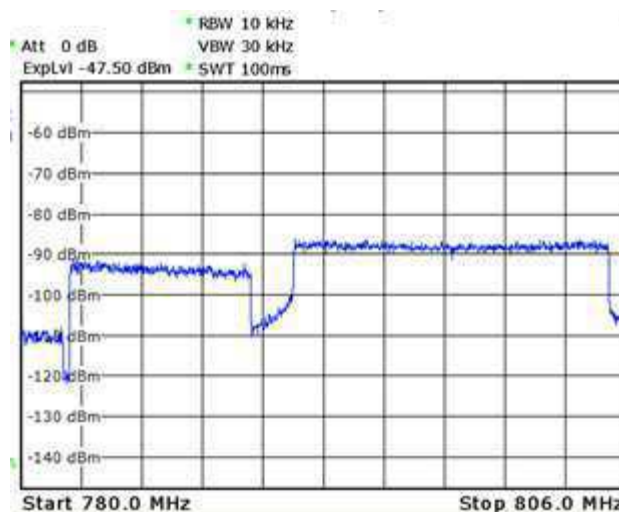
Na Obr. 5.17 se opět zmenšil ochranný interval z 1/8 na 1/16, s tím byla nutná změna pilot pattern. Experimentálně byla zvolena změna z PP3 na PP8. Zajímavé je, že ne všechny STB podporují příjem PP8. Dekódování takového signálu je obtížnější, protože PP8 jako jediný neobsahuje v posledním přenášeném symbolu, symbol uzavírající příslušný rámec [10]. Změnou těchto dvou parametrů současně došlo ke zlepšení odolnosti DVB-T2 vysílání o 2 dB pro STB Emos v celém rozsahu hodnot B_{LTE} . Thomson, IceCrypt a ETL Analyzátor mění svoji citlivost pouze minimálně, v rozsahu 1 dB parametru C/I s referenčním měřením. Thomson se opět jeví jako nejrobustnější přístroj.

Změna modulace na 256QAM způsobila v Obr. 5.18 předpokládanou zhoršenou odolnost proti rušení LTE pro všechny měřící přístroje. Nabízí se zde znovu porovnání s úplně prvním scénářem (Obr. 5.4), kde se opět liší pouze nastavení FFT módu. Pro STB Emos platí, že změna FFT na 16K-Extended zlepšila odolnost o 2 dB pouze při $B_{LTE}=1,4$ MHz. Na šířkách LTE od 10 do 20 MHz, se odolnost snížila o 2 dB. Podobnou charakteristiku má i STB Thomson, kde změna FFT působí na úzkopásmové rušení lepší odolností. U širokopásmové dochází ke zhoršení mezi 2-3 dB.

V Obr. 5.19 se jako v jediném scénáři mění kódový parametr na ještě bezpečnější. $CR=1/2$ se obvykle používá při nízkých modulacích (16QAM) a mobilním příjmu s nízkou přenosovou rychlostí (jednotky Mbit/s) [19]. Při použité modulaci 64QAM nebylo možné vygenerovat LTE signál pomocí SMU 200A dostatečně silný, aby došlo k vypadnutí vysílání DVB-T2. Z tohoto důvodu podobně jak v Tab. 5.5 se parametr $C/I=-60$ dBm při $B_{LTE}=1,4$ a 3 MHz (pro STB Emos a Thomson). Výhoda robustnějšího kódového poměru se u STB Emos příliš neprojevila. Kdy se průměrně zlepšila odolnost o 2 dB. Pro porovnání s předešlým měřením (změna CR z 2/3 na 4/5, Obr. 5.7) se odolnost zhoršila o 7 dB. U STB Thomson rozdíl v odolnosti je pouze 1 dB. Tento kódový poměr má největší vliv na STB IceCrypt, kde dochází ke zhoršení odolnosti o 2 dB pro rozsah B_{LTE} od 3 do 20 MHz. ETL Analyzátor reaguje na změnu kódového poměru při úzkopásmovém vysílání LTE a to od 1,4 do 10 MHz podobně jako IceCrypt, kde dochází ke zhoršení odolnosti proti rušení.



Obr. 5.20 Konstelační diagramy pro modulaci 64QAM, $B_{LTE}=20$ MHz a) Samotný signál DVB-T2 bez rušení b) Shodné výkonové úrovně DVB-T2 a LTE (-60 dBm) s 1 MHz GB c) Překročení QEF hranice



Obr. 5.21 RF spektrum DVB-T2 a LTE ($B_{LTE}=15$ MHz), GB=1 MHz, Center=793 MHz, Span=26 MHz

V Obr. 5.20 jsou zobrazené konstelační diagramy modulace 64QAM pro různé hodnoty rušení signálu LTE. Obr. 5.21 znázorňuje RF spektrum pro šířku pásma LTE 15 MHz.

ZÁVĚR

V této bakalářské práci byly popsány systémy DVB-T2 a LTE. Byly definované okolnosti, kvůli kterým bylo nutné tyto dva systémy umístit v přílehlých pásmech, a ve kterých mohou vznikat kritické scénáře ovlivňující kvalitu TV přenosu DVB-T2. Byly definované parametry pro systém DVB-T2 a parametry pro vysílání LTE. Bylo navrhnuté měřicí pracoviště a ozkoušená jeho funkčnost. Byly zvolené skutečné scénáře, které se nejčastěji vyskytují ve reálném prostředí. Bylo prokázáno, které parametry mají největší vliv na odolnost televizního vysílání a v jaké míře.

Tato práce klade důraz na subjektivní posouzení vlivu rušení na kvalitu TV vysílání. Byly otestované různé koexistenční scénáře při střídání několika reálných STB od odlišných výrobců, které jsou k dispozici v laboratoři. Změny zobrazení signálu na TV mezi rozdílnými STB byly vyzdvížené a okomentované při zpracování stejného rušeného DVB-T2 signálu. Byla vytvořená laboratorní úloha do předmětu Digitální televizní a rozhlasové systémy a její vzorové vypracování. Všechny změřené hodnoty, stejně tak jako laboratorní úloha a její vzorové vypracování jsou uloženy na přiloženém CD.

Z části této práce byl vytvořený článek, který byl prezentován na studentské soutěži EEICT 2019 [24].

LITERATURA

- [1] *První digitální dividenda* [online]. , 1-19 [cit. 2018-10-24]. Dostupné z: https://www.ctu.cz/cs/download/digitalni_dividenda/080808_digitalni_dividenda.pdf
- [2] *Mapy pokrytí přechodových sítí DVB-T2* [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <http://www.televizniweb.cz/mapy-pokryti-prechodovych-siti-dvb-t2/>
- [3] *Vše o vysílání v DVB-T2 v ČR: MPEG-4, H.265, HEVC* [online]. [cit. 2018-10-24]. Dostupné z: <https://www.antena.cz/vse-o-vysilani-v-dvb-t2-h-265-hevc-v-cr-c216/>
- [4] Pospíchal, M. *Digitální pozemní televizní vysílání DVB-T/H a DVB-T2*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. 140 s. Vedoucí práce doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
- [5] Strouhal, A. *Simulace RF přenosového kanálu pro DVB-T2*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. 72 s. Vedoucí práce Ing. Ladislav Polák.
- [6] Mikláš, M. *Koexistence bezdrátových komunikačních systému A LTE v pásmu ISM*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. 90 s. Vedoucí práce Ing. Ladislav Polák, Ph.D.
- [7] *Nové technologie mobilních komunikací pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO* [online]. Brno: elektronické, 2013 [cit. 2018-10-28]. ISBN 978-80-214-4824-7. Dostupné z: <https://vut-vsbs.cz/home/get-file?file=422&%3Bportal=Portal2>
- [8] *Coexistence Digital TV and LTE: Rohde & Schwarz* [online]. In: . s. 34 [cit. 2018-11-03].
- [9] Plaisner, D. *Koexistence stávajících a nových generací zemské digitální televize a mobilních bezdrátových komunikačních služeb*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2015. 76 s., 24 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Ladislav Polák, Ph.D.
- [10] *ETSI EN 302 755 V1.3.1. (2012-04). Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)*. 2012.

- [11] *Měření signálu* [online], 1 [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: <https://eshop.antech.cz/mereni-signalu/>
- [12] Kozlík, A. *Coding and effectivity of LDPC codes*. Praha, 2011. Diplomová práce. Charles University in Prague. Vedoucí práce Prof. RNDr. Aleš Drápal CSc., DSc.
- [13] Ryšánek, F. *Pásmo LTE/UMTS/EDGE/GSM používaná v České republice* [online]. 2016, 1 [cit. 2018-12-06]. Dostupné z: <http://www.fccps.cz/pasma-lteumtsedgsm-pouzivana-v-ceske-republice-1379>
- [14] *České Radiokomunikace už mají ideální parametry pro české DVB-T2* [online], 1 [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://www.lupa.cz/clanky/cra-uz-maji-idealni-parametry-pro-ceske-dvb-t2/>
- [15] Polak, Ladislav & Kresta, Daniel & Miloš, Jiří & Kratochvíl, Tomas & Marsalek, Roman. *Coexistence of DVB-T2 and LTE in the 800 MHz Band: Analysis of DVB-T2 System Configurations*. Brno, 2018. 4 s. Conference Paper. Brno University of Technology.
- [16] *Zakulisí DVB - teorie a technické informace* [online]. 2009, 4 [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://www.tvfreak.cz/zakulisi-dvb-teorie-a-technicke-informace/2988-5>
- [17] Carlos Gómez-Calero, Luis Cuéllar Navarrete, Leandro de Haro, Ramón Martínez. *A 2 x 2 MIMO DVB-T2 System: Design, New Channel Estimation Scheme and Measurements With Polarization Diversity* [online]. In: . 9 [cit. 2018-12-08].
- [18] ETSI TS 136 305 V11.1.0 (2012-10). *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Stage 2 functional specification of User Equipment (UE) positioning in E-UTRAN (3GPP TS 36.305 version 11.1.0 Release 11)*. 2012.
- [19] BT Series Broadcasting service. *Frequency and network planning aspects of DVB-T2* [online]. Report ITU-R BT.2254-3 (03/2017)
- [20] Český telekomunikační úřad. *Experimentální vysílání DVB-T2: Závěrečná zpráva*. 2012. 22 s.
- [21] Ladislav Polák, Tomáš Kratochvíl. *Performance of the Rotated Constellation in DVB-T2*. Brno, Czech Republic, 2012. s. 4. ISBN 978-1-61208-193-9.
- [22] M. Turrillas, A. Corte's, J.F. Sevillano, I. Ve'lez, C. Oria, A. Irizar and V. Baen. *Comparison of area-efficient FFT algorithms for DVB-T2 receivers* [online]. In: . 12 March 2010, 2 s [cit. 2019-04-27]. DOI: 10.1049/el.2010.0676.

- [23] *LTE TDD Special Subframe and Its significance for Cell Size* [online]. 2017. Dostupné z: <http://www.techplayon.com/lte-tdd-special-subframe-and-its-significance-for-cell-size/>
- [24] Walach, Dominik. *Coexistence between DVB-T2 and LTE systems in the 800 MHz band-a measurement methodology*, *Proceedings of the 25 th Conference STUDENT EEICT 2019*. Brno, 2019. 90-92 s. ISBN 978-80-214-5735-5.
- [25] Mikel Mendicute, Iker Sobrón, Lorena Martínez and Pello Ochandiano (2010). *DVB-T2: New Signal Processing Algorithms for a Challenging Digital Video Broadcasting Standard*, *Digital Video*, Floriano De Rango (Ed.), ISBN: 978-953-7619-70-1, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/digital-video/dvb-t2-new-signal-processing-algorithms-for-a-challenging-digital-video-broadcasting-standard>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Návrh laboratorní úlohy

Příloha B – Vzorové vypracování laboratorní úlohy

PŘÍLOHA A

Digitální televizní a rozhlasové systémy (MDTV, LDTV)

Laboratorní úloha

MĚŘENÍ KOEXISTENCE DVB-T2 A LTE VE FREKVENČNÍM PÁSMU 800 MHz

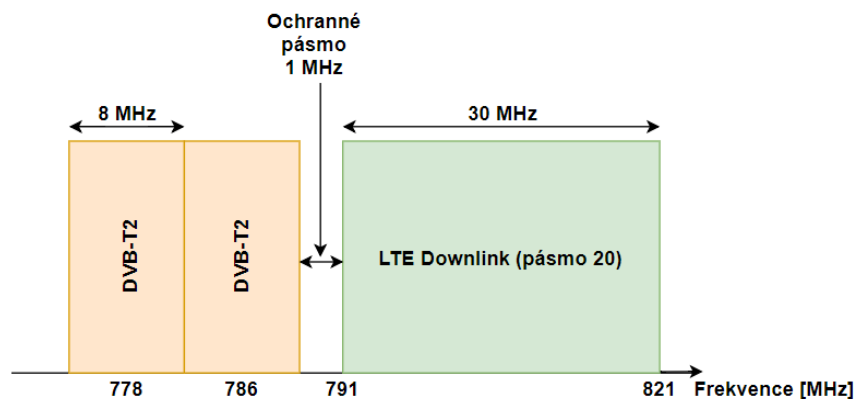
V této úloze se budete věnovat aktuální problematice koexistence systémů DVB-T2 a LTE v České republice, která může způsobit zhoršený příjem TV vysílání v pásmu 800 MHz. Cílem této úlohy je prostudovat odolnost systému DVB-T2 vůči rušícímu LTE. V práci se budete zabývat měřením RF signálů, měřením výkonu v kanále, určením hodnoty ochranného poměru pro DVB-T2 aby příjem stále splňoval tzv. Quasi-Error-Free (QEF) přenos.

Teoretický úvod

Standard Digital Video Broadcasting – Terrestrial (DVB-T), sloužící pro digitální terestrické TV vysílání, je postupně nahrazováno jeho novou generací DVB-T2 (2nd Generation DVB-T). DVB-T2 umožňuje oproti DVB-T lepší využití radiofrekvenčního (RF) spektra a přenos více TV programů v lepší kvalitě. Obraz je komprimován do licencovaných formátů MPEG-4 AVC (H.264) či MPEG-H HEVC (H.265). Oproti DVB-T2 umožňuje např. přenos až v Ultra High Definition (UHD) kvalitě.

Technologie Long Term Evolution (LTE) je určená pro vysokorychlostní internet v mobilních sítích. Vznikla na základech systému Universal Mobile Telecommunications System (UMTS). Umožňuje poskytování mobilních služeb v downlink a uplink přenosových módech a při různých systémových nastaveních. V současné době je nejrozšířenějším standardem pro mobilní telefony na světě. Teoretická rychlost stahování (downlink) je 172,8 Mbit/s a odesílání (uplink) 57,6 Mbit/s. Je možné nastavovat různé šířky pásma (B_{LTE}) od 1,4 až do 20 MHz.

S rostoucím počtem uživatelů využívajících službu LTE je nutné rozšíření počtu RF pásem pro LTE, aby byly splněny podmínky pro jeho rychlý přenos. V současnosti dochází k postupnému obsazení UHF pásem 700 MHz a 800 MHz, které momentálně ještě využívá DVB-T2. Ke koexistenci DVB-T2 a LTE systémů dochází hlavně v pásmu 800 MHz (20. pásmo LTE), kde se nachází pouze 1 MHz ochranného pásma (tzv. guard band – GB) zamezující přímému rušení systému DVB-T2 systémem LTE a naopak (Obr. 1). Nedochází k částečnému překrytí obou RF signálů při normálních výkonových úrovních, ale stále hrozí vzájemná interakce obou systémů. K ovlivňování TV signálu a jeho výpadkům dochází při vyšší intenzitě rušícího signálu LTE. Ochranné pásmo při větším rušícím signálu LTE zaniká a dochází k částečnému překrývání RF spekter.



Obr. 1 Zobrazení rozložení spektra 800 MHz

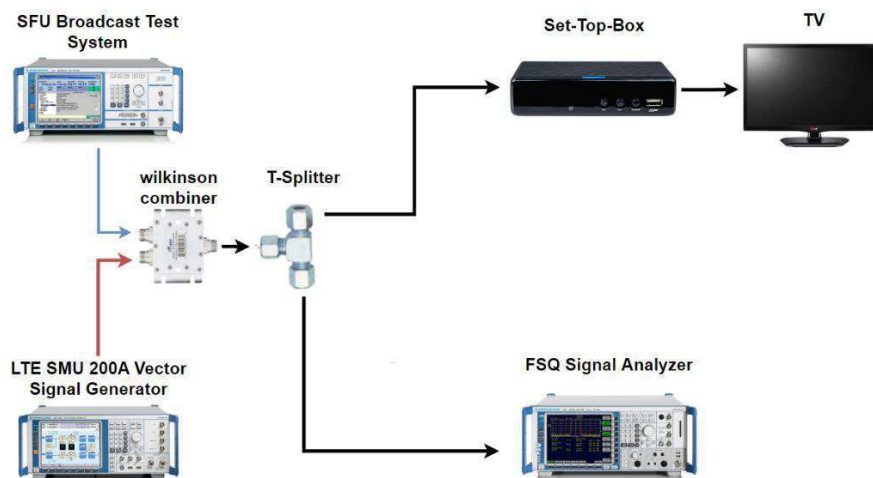
V této úloze se vytvoří signály DVB-T2 a LTE z generátorů od firmy Rohde & Schwarz (R&S) SFU a SMU 200A. Následně se oba RF signály spojí v slučovači. Směs RF signálů je pak rozdělena na 2 části. První směřuje do spektrálního analyzátoru FSQ (měření výkonu signálu v daném kanále) a druhá do STB+TV, kde je možné subjektivně posoudit výslednou kvalitu obrazu. Blokové schéma je zobrazené na Obr. 2.

Tab. 1 Parametry DVB-T2

	DVB-T2
Kmitočtové pásmo	8 MHz
FFT	32K-Extended
Pilot pattern (PP)	PP2
Ochranný interval	1/8
Modulace	256QAM
Kódový poměr	2/3
C/N	30 dB

Tab. 1 Parametry pro LTE

Kódový poměr	1/3 (Turbo)
Modulace subnárodních	QPSK
Šířka pásma (B_{LTE})	1,4 MHz
	5 MHz
	10 MHz
	20 MHz
Velikost IFFT	128
	512
	1024
	2048
Provozní mód	FDD
Ochranný interval	4,7 μ s



Obr. 2 Blokové schéma zapojení

Zadání a postup měření

1. Pokud všechny zařízení jsou v provozu tak na generátoru DVB-T2 SFU nastavte příslušné parametry pro televizní signál z Tab. 1.

Postup:

Nejdříve nastavte vysílací frekvenci na 786 MHz (60. kanál). Tu nastavíte v první záložce *FREQUENCY – FREQUENCY – 786 MHz* (záložka se nachází na levé straně obrazovky).

Dále klikněte na *MODULATION – MODULATION – ON*,
SIGNAL SOURCE – DTV,
TRANSMISSION STANDARD – DVB-T2,
SPECTRUM – NORMAL

Nyní klikněte na záložku *DIGITAL TV – INPUT SIGNAL – SOURCE – TS PLAYER*. Testovací vysílání bude na TV přijímači pojmenováno Diver.

Poté klikněte na záložku *BICM*, zde vyberte *FEC FRAME – NORMAL*,
CODE RATE – 2/3,
CONSTELL. – 256QAM,
CONSTEL. ROTATION – OFF,

Následuje *FRAMING+OFDM – CHANNEL BANDWIDTH – 8 MHz*,
FFT SIZE – 32K EXT,
GUARD INTERVAL – 1/8,
PILOT PATTERN – PP2.

V záložce *IMPAIRMENTS* zkontrolujte až jsou všechny tučné nastavení v režimu **off**.

Rozklikněte záložku *NOISE*, zvolte *AWGN* a nastavte hodnotu na *30 dB*. Zkontrolujte *FAIDING – STATE – OFF*.

Zmačkněte tlačítko *RF ON/OFF* pro vysílání DVB-T2.

2. Pro nastavení generátoru LTE SMU použijeme output B, proto budeme nastavovat všechny parametry ve spodní kaskádě displeje. Budou se měnit hodnoty středních frekvencí vysílání LTE, ty si průběžně počítejte (příklad výpočtu pro $B_{LTE}=20$ MHz: GB mezi DVB-T2 a LTE je vždy 1 MHz, proto se *Freq* zvolí tak aby poslední postranní nosná končila na kmitočtu 791 MHz, pro 20 MHz šířky pásma LTE bude *Freq*=801 MHz-celkový rozsah bude od 791 MHz do 811 MHz). Začínat se bude od největší šířky pásma (20 MHz) aby se ušetřil čas mi vyplňování zdrojových bloků (resource block-RB) po každé změně B_{LTE} .

Postup:

B Freq zvolte **801 MHz** (pro $B_{LTE} = 20$ MHz), tato frekvence se bude měnit v závislosti na B_{LTE} .

Nastavte *Lev* na **-90 dBm** (pravý horní roh obrazovky).

Klikněte na první blok *Basedband B config-EUTRA/LTE... – STATE – ON*

Vyberte vždy *Duplexing – FDD*

Link Direction – Downlink (OFDMA),

Sequence Length – 1 Frame.

Poté klikněte na *General Settings...* a vyberte příslušnou šířku pásma, začneme na **20 MHz**. Ujistěte se, že velikost *FFT Size* odpovídá příslušné šířce pásma LTE (viz Tab. 2)!

Dále je nutné nastavení generujících subrámců, vrátíme se o jeden krok zpět a vybereme *Frame Configuration... – No. of Configurable Subframes* zvolíme maximum **10**,

Pro *Subframe-0*, vytočíme kolečkem myši *No. of Used Allocations* vždy na maximální možnou hodnotu. Nyní postupně inkrementujeme *Subframe (0-9)* a nastavujeme maximální hodnotu pro *No. of Used Allocations* (Tip: používejte tlačítka *Copy* a *Paste* pro rychlejší práci). Nakonec ujistěte, že jsou bloky *AWGN* a *Fading* na hlavní obrazovce vypnuté, povolte výstup *RF/A Mod B – ON*.

3. FSQ, bude sloužit jako hlavní měřicí přístroj, ze kterého budeme číst hodnoty a je tedy nutné ho správně nastavit.

Postup:

Zmáčkněte tlačítko *FREQ* a nastavte na klávesnici frekvenci **786 MHz**, dále tlačítko *SPAN – 35 MHz* (tyto údaje budete upravovat během měření, protože se bude lišit šířka pásma LTE).

Nyní je nutné nastavit měření výkonu v kanálu. Tlačítko *MEAS – CHAN PWR ACP – CP/ACP CONFIG – CHANNEL BANDWIDTH – 8 MHz*.

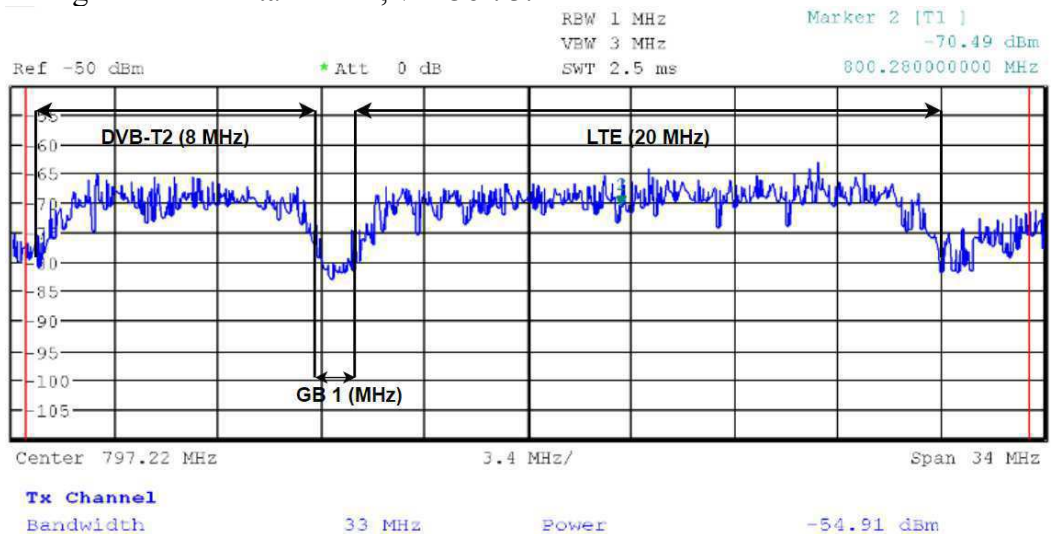
Vraťte se k přístroji SFU a v záložce *LEVEL – LEVEL*-nastavte sílu signálu DVB-T2 abychom na FSQ naměřili **-60 dBm** (během přenosu signálu pomocí koaxiálních kabelů může docházet k odlišnému útlumu, většinou se hodnota pohybuje okolo **-55 dBm**).

Na FSQ změníme šířku kanálu z 8 na 34 MHz, *CHANNEL BANDWIDTH – 34 MHz* (tato hodnota musí být vždy menší jak *SPAN*).

Vždy je nutné měřit jak signál DVB-T2, tak i LTE, proto šířku kanálu měníme podle B_{LTE} .

Nyní na generátoru SMU zvětšené úroveň signálu z **-90 dBm** na **-50 dBm**.

Na analyzátoru FSQ se zobrazí zesílený signál LTE, zmáčkněte *FREQ* a pomocí kolečka nastavte střední frekvenci tak aby se v kanále zobrazil jak signál DVB-T2 tak i LTE, viz Obr. 3.



Obr. 3 Zobrazení obou spekter na FSQ analyzátoru pro B_{LTE} 20 MHz

4. Nyní je nutné nastavit STB na pracovišti, konkrétně Emos EM180 HD, Thomson THT712 a IceCrypt STC6000HD PVR. Na dálkovém ovladači zapneme TV Samsung a pomocí ovladačů nastavíme příslušné STB. Pozn.: Nejprve zkontrolujte, zda příslušné kanály už nejsou naladěny, pokud najdete program Diver v nabídce naladěných kanálů tak pokračujte k bodu 5.

Postup:

Naladění Thomson THT712:

Zmačkněte tlačítko *MENU-Instalace-Ruční vyhledávání-Č. kanálu – CH60(786.00 MHz) a Vyhledat.*

Naladění IceCrypt STC6000HD PVR:

Zmačkněte tlačítko *MENU – Instalace – Hledání Terestriálu – Mód hledání – Ručně, program – 60 a Spustit hledání.*

Naladění Emos EM180 HD:

MENU – Instalace – Ruční vyhledávání – Číslo programu – 60, Spustit vyhledávání, Exit.

5. V tomto bodě budete postupně zvyšovat úroveň LTE až do doby kdy vypadne signál DVB-T2. Je třeba si dát pozor, aby měření bylo co nejpřesnější a z tohoto důvodu upravovat výkon LTE co nejjemněji.

Postup:

Budeme postupně zvyšovat úroveň LTE na generátoru SMU až do doby kdy vypadne signál zobrazovaný na TV. Signál zesilujte po jednotkách dBm, nikdy po desítkách, protože může dojít ke poškození přístrojů! Nepřekračujte větší výkon LTE jak 5 dBm, může dojít ke rušení/zničení měřících přístrojů. Jakmile signál vypadne tak po desetínách ladte signál LTE až do doby, kdy na obrazovce uvidíte vysílání v nerušivé kvalitě. Zapište si změřený výkon v kanále zobrazený na FSQ analyzátoru a stejný postup aplikujte i na druhý a třetí STB (přepojte kabely ze zadní strany). Před každým měřením zeslabte výkon LTE na -90 dBm.

6. Zde dochází k proměření více šířek pásma LTE. Uloží/překreslí se se také 4 zobrazení spektra, které jsou součástí vypracování této úlohy.

Postup:

Budeme Proměříte další šířky pásem LTE a jejich vlivy na rušení signálu DVB-T2. Volte šířky 10, 5 a 1,4 MHz (*General Settings-Channel Bandwidth*). U $B_{LTE}=10$ MHz a 1,4 MHz se překreslete, nebo uložte na USB flash disk průběh z FSQ (*HCOPY – PRINT SCREEN*), kde jde vidět jak signál DVB-T2 a LTE, tak i ochranný interval (viz Obr. 3). To samé zopakujte pro obě šířky pásma v momentě kdy naleznete maximální hodnotu rušení, která ještě umožňuje stabilní a čitelný příjem (maximální hodnota rušení, která ještě nezhoršuje kvalitu vysílání). Na konci měření tedy budete mít 4 zobrazení spekter (2 pro nerušené vysílání a 2 pro rušené, ale stále dobře dekodované na TV přijímači). V případě překreslení spekter si zapište střední frekvence a rozsahy obou systémů. Nezapomeňte vypnout výstupní blok při každém přeladování. Vždy je

nutné změnit SPAN a šířku kanálu na FSQ analyzátoru tak aby tam byly v celkové míře zobrazené oba signály a aby byly zobrazené na celé šířce zobrazeného spektra (tímto způsobem zajistíte nejpřesnější změřené hodnoty, viz Obr. 3). Dále je důležité kontrolovat střední frekvenci LTE, která je nastavená vždy tak aby byl 1 MHz mezera (GB) mezi DVB-T2 a LTE signály. Při změně B_{LTE} není nutné pokaždé měnit *No. of Used Allocations*, protože při zmenšování B_{LTE} se počet subnosných automaticky zmenší a zaplnění zůstane maximální pro danou šířku (stačí tedy měnit jen šířku pásma a střední frekvenci).

7. Po doměření prvního scénáře, změňte modulaci na SFU z 256QAM na 64QAM (*BICM – CONSTELL. – 64QAM*) a znovu proveďte nastavení generátoru SMU a FSQ jako v bodě 2 a 3. Po odměření všech šířek pásma proměřte třetí scénář-změňte (modulace 64QAM) ještě kódový poměr na 4/5 (*BICM – CODE RATE – 4/5*).
8. Pro vyhodnocování odolnosti DVB-T2 signálu vůči rušícímu LTE se použije parametr carrier-to-interference ratio (C/I), kde C je úroveň signálu na vstupu DVB-T2 přijímače. V měření se nastavovalo $C = -60$ dBm. Poměr C/I se pak vypočte jako $C/I [dB] = C [dBm] - I [dBm]$. Z naměřených hodnot vypočítejte parametr C/I pro všechny 3 scénáře, každý scénář zobrazte v samostatném grafu. V grafu vynesete závislost parametru C/I na B_{LTE} .

Použité měřicí přístroje

STB1 digitální televizní přijímač DVB-T/T2 IceCrypt STC6000HD + dálkové ovládání

STB2 digitální televizní přijímač DVB-T/T2 Thomson THT712 + dálkové ovládání

STB3 digitální televizní přijímač DVB-T/T2 Emos EM180 HD + dálkové ovládání

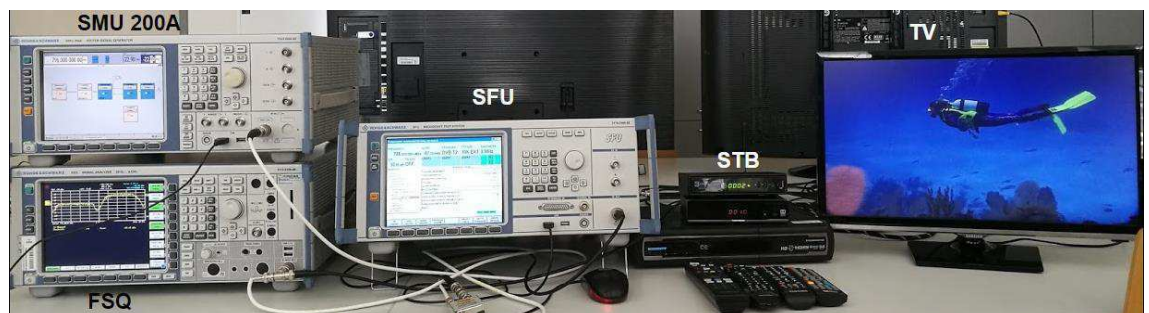
TVP televizní přijímač Samsung + dálkové ovládání

SFU laboratorní vysílač DVB-T/T2 R&S SFU Broadcast Test Systém

SMU laboratorní vysílač R&S LTE SMU 200A Vector Signal Generator

FSQ měřicí přijímač R&S FSQ Signal Analyzer

propojovací vodiče 3 x BNC-BNC, 1 x BNC – anténní, 1 x T člen BNC, Wilkinsonův dělič, HDMI



Obr. 4 Rozložení přístrojů v laboratoři

Závěr

Do závěru každý student zhodnotí každý bod měření. Komentujte vzniklé průběhy, jejich úrovně, odolnosti vůči rušícímu signálu LTE, vliv změněných parametrů na odolnost a pokud se výsledky shodují s teoretickými předpoklady. Zmiňte problémy, které se objevily během měření.

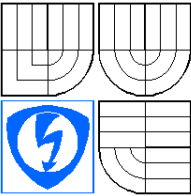
Kontrolní otázky

1. Co si myslíte, že má větší vliv na robustnosti signálu. Vnitřní modulace nebo ochranný interval, vysvětlete?
2. Proč musíme při měření počítat s výkonem kanálu, a ne s výkonem na generátoru SMU 200A?
3. Jaký vliv má na odolnost signálu a na jeho datový tok změna kódového poměru z 2/3 na 4/5, vysvětlete?

Použitá a doporučená literatura

- [1] Polak, Ladislav & Kresta, Daniel & Miloš, Jiří & Kratochvil, Tomas & Marsalek, Roman. *Coexistence of DVB-T2 and LTE in the 800 MHz Band: Analysis of DVB – T2 System Configurations*. Brno, 2018. Conference Paper. Brno University of Technology.
- [2] *První digitální dividenda* [online]. , 1-19 [cit. 2018-10-24]. Dostupné z: https://www.ctu.cz/cs/download/digitalni_dividenda/080808_digitalni_dividenda.pdf
- [3] *České Radiokomunikace už mají ideální parametry pro české DVB-T2* [online]. Dostupné z: <https://www.lupa.cz/clanky/cra-uz-maji-idealni-parametry-pro-ceske-dvb-t2/>

PŘÍLOHA B

 VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ	Předmět Digitální televizní a rozhlasové systémy (MDTV, LDTV)	
	Jméno	
	Ročník	Studijní skupina
	Spolupracoval	Měřeno dne
Kontroloval	Hodnocení	Dne
Číslo úlohy	Název úlohy MĚŘENÍ KOEXISTENCE DVB-T2 A LTE NA FREKVENCI 800 MHZ	

Zadání

1. Pokud všechny zařízení jsou v provozu tak na generátoru DVB-T2 SFU nastavte příslušné parametry pro televizní signál z Tab. 1.

Postup:

Nejdříve nastavte vysílací frekvenci na 786 MHz (60. kanál). Tu nastavíte v první záložce *FREQUENCY – FREQUENCY – 786 MHz* (záložka se nachází na levé straně obrazovky).

Dále klikněte na *MODULATION – MODULATION – ON*,
SIGNAL SOURCE – DTV,
TRANSMISSION STANDARD – DVB-T2,
SPECTRUM – NORMAL

Nyní klikněte na záložku *DIGITAL TV – INPUT SIGNAL – SOURCE – TS PLAYER*. Testovací vysílání bude na TV přijímači pojmenováno Diver.

Poté klikněte na záložku *BICM*, zde vyberte *FEC FRAME – NORMAL*,
CODE RATE – 2/3,
CONSTELL. – 256QAM,
CONSTEL. ROTATION – OFF,

Následuje *FRAMING+OFDM – CHANNEL BANDWIDTH – 8 MHz*,
FFT SIZE – 32K EXT,
GUARD INTERVAL – 1/8,
PILOT PATTERN – PP2.

V záložce *IMPAIRMENTS* zkontrolujte až jsou všechny tučné nastavení v režimu **off**.

Rozklikněte záložku *NOISE*, zvolte *AWGN* a nastavte hodnotu na *30 dB*. Zkontrolujte *FAIDING – STATE – OFF*.

Zmačkněte tlačítko *RF ON/OFF* pro vysílání DVB-T2.

2. Pro nastavení generátoru LTE SMU použijeme output B, proto budeme nastavovat všechny parametry ve spodní kaskádě displeje. Budou se měnit hodnoty středních frekvencí vysílání LTE, ty si průběžně počítejte (příklad výpočtu pro $B_{LTE}=20$ MHz: GB mezi DVB-T2 a LTE je vždy 1 MHz, proto se *Freq* zvolí tak aby poslední

postranní nosná končila na kmitočtu 791 MHz, pro 20 MHz šířky pásma LTE bude $Freq=801$ MHz-celkový rozsah bude od 791 MHz do 811 MHz). Začínat se bude od největší šířky pásma (20 MHz) aby se ušetřil čas mi vyplňování zdrojových bloků (resource block-RB) po každé změně B_{LTE} .

Postup:

B Freq zvolte **801 MHz** (pro $B_{LTE} = 20$ MHz), tato frekvence se bude měnit v závislosti na B_{LTE} .

Nastavte *Lev* na **-90 dBm** (pravý horní roh obrazovky).

Klikněte na první blok *Basedband B config-EUTRA/LTE... – STATE – ON*

Vyberte vždy *Duplexing – FDD*

Link Direction – Downlink (OFDMA),

Sequence Length – 1 Frame.

Poté klikněte na *General Settings...* a vyberte příslušnou šířku pásma, začneme na **20 MHz**. Ujistěte se, že velikost *FFT Size* odpovídá příslušné šířce pásma LTE (viz Tab. 2)!

Dále je nutné nastavení generujících subrámců, vrátíme se o jeden krok zpět a vybereme *Frame Configuration... – No. of Configurable Subframes* zvolíme maximum **10**,

Pro *Subframe-0*, vytočíme kolečkem myši *No. of Used Allocations* vždy na maximální možnou hodnotu. Nyní postupně inkrementujeme *Subframe* (0-9) a nastavujeme maximální hodnotu pro *No. of Used Allocations* (Tip: používejte tlačítka *Copy* a *Paste* pro rychlejší práci).

Nakonec ujistěte, že jsou bloky *AWGN a Fading* na hlavní obrazovce vypnuté, povolte výstup *RF/A Mod B – ON*.

3. FSQ, bude sloužit jako hlavní měřicí přístroj, ze kterého budeme číst hodnoty a je tedy nutné ho správně nastavit.

Postup:

Zmáčkněte tlačítko *FREQ* a nastavte na klávesnici frekvenci **786 MHz**, dále tlačítko *SPAN – 35 MHz* (tyto údaje budete upravovat během měření, protože se bude lišit šířka pásma LTE).

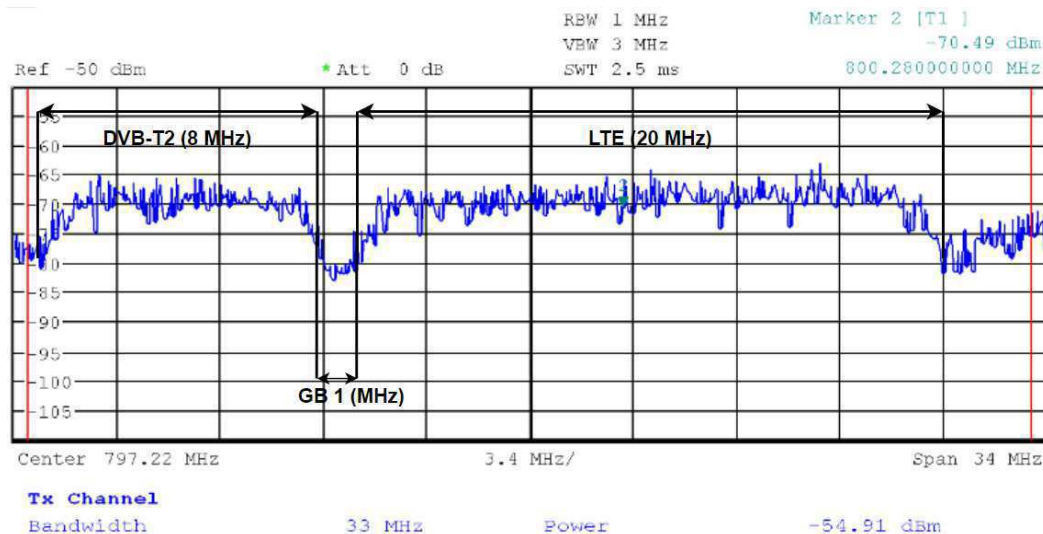
Nyní je nutné nastavit měření výkonu v kanálu. Tlačítko *MEAS – CHAN PWR ACP – CP/ACP CONFIG – CHANNEL BANDWIDTH – 8 MHz*.

Vraťte se k přístroji SFU a v záložce *LEVEL – LEVEL*-nastavte sílu signálu DVB-T2 abychom na FSQ naměřili **-60 dBm** (během přenosu signálu pomocí koaxiálních kabelů může docházet k odlišnému útlumu, většinou se hodnota pohybuje okolo **-55 dBm**).

Na FSQ změňme šířku kanálu z 8 na 34 MHz, *CHANNEL BANDWIDTH – 34 MHz* (tato hodnota musí být vždy menší jak *SPAN*).

Vždy je nutné měřit jak signál DVB-T2, tak i LTE, proto šířku kanálu měňme podle B_{LTE} .

Nyní na generátoru SMU zvětšené úroveň signálu z **-90 dBm** na **-50 dBm**. Na analyzátoru FSQ se zobrazí zesílený signál LTE, zmáčkněte *FREQ* a pomocí kolečka nastavte střední frekvenci tak aby se v kanále zobrazil jak signál DVB-T2 tak i LTE, viz Obr. 3.



Obr. 3 Zobrazení obou spekter na FSQ analyzátoru pro BLTE 20 MHz

- Nyní je nutné nastavit STB na pracovišti, konkrétně Emos EM180 HD, Thomson THT712 a IceCrypt STC6000HD PVR. Na dálkovém ovladači zapneme TV Samsung a pomocí ovladačů nastavíme příslušné STB. Pozn.: Nejprve zkontrolujte, zda příslušné kanály už nejsou naladěny, pokud najdete program Diver v nabídce naladěných kanálů tak pokračujte k bodu 5.

Postup:

Naladění Thomson THT712:

Zmačkněte tlačítko *MENU-Instalace-Ruční vyhledávání-Č. kanálu – CH60(786.00 MHz) a Vyhledat.*

Naladění IceCrypt STC6000HD PVR:

Zmačkněte tlačítko *MENU – Instalace – Hledání Terestriálu – Mód hledání – Ručně, program – 60 a Spustit hledání.*

Naladění Emos EM180 HD:

MENU – Instalace – Ruční vyhledávání – Číslo programu – 60, Spustit vyhledávání, Exit.

- V tomto bodě budete postupně zvyšovat úroveň LTE až do doby kdy vypadne signál DVB-T2. Je třeba si dát pozor, aby měření bylo co nejpřesnější a z tohoto důvodu upravovat výkon LTE co nejjemněji.

Postup:

Budeme postupně zvyšovat úroveň LTE na generátoru SMU až do doby kdy vypadne signál zobrazovaný na TV. Signál zesilujte po jednotkách dBm, nikdy po desítkách, protože může dojít ke poškození přístrojů! Nepřekračujte větší výkon LTE jak 5 dBm, může dojít ke rušení/zničení měřících přístrojů. Jakmile signál vypadne tak po desetínách ladte signál LTE až do doby, kdy na obrazovce uvidíte vysílání v nerušivé kvalitě. Zapište si změřený výkon v kanále zobrazený na FSQ analyzátoru a stejný postup aplikujte i na druhý a třetí STB (přepojte kabely ze zadní strany). Před každým měřením zeslabte výkon LTE na -90 dBm.

6. Zde dochází k proměření více šířek pásma LTE. Uloží/překreslí se se také 4 zobrazení spektra, které jsou součástí vypracování této úlohy.

Postup:

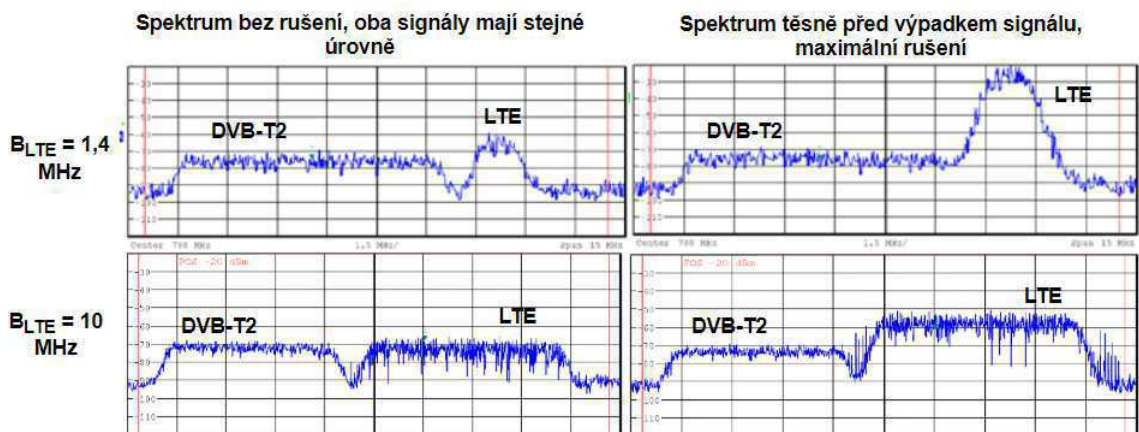
Budeme Proměříme další šířky pásem LTE a jejich vlivy na rušení signálu DVB-T2. Volte šířky 10, 5 a 1,4 MHz (*General Settings-Channel Bandwidth*). U $B_{LTE}=10$ MHz a 1,4 MHz se překreslete, nebo uložte na USB flash disk průběh z FSQ (*HCOPY – PRINT SCREEN*), kde jde vidět jak signál DVB-T2 a LTE, tak i ochranný interval (viz Obr. 3). To samé zopakujte pro obě šířky pásma v momentě kdy naleznete maximální hodnotu rušení, která ještě umožňuje stabilní a čitelný příjem (maximální hodnota rušení, která ještě nezhoršuje kvalitu vysílání). Na konci měření tedy budete mít 4 zobrazení spekter (2 pro nerušené vysílání a 2 pro rušené, ale stále dobře dekódované na TV přijímači). V případě překreslení spekter si запиšte střední frekvence a rozsahy obou systémů. Nezapomeňte vypnout výstupní blok při každém přeladování. Vždy je nutné změnit SPAN a šířku kanálu na FSQ analyzátoru tak aby tam byly v celkové míře zobrazené oba signály a aby byly zobrazené na celé šířce zobrazeného spektra (tímto způsobem zajistíte nejpřesnější změřené hodnoty, viz Obr. 3). Dále je důležité kontrolovat střední frekvenci LTE, která je nastavená vždy tak aby byl 1 MHz mezera (GB) mezi DVB-T2 a LTE signály. Při změně B_{LTE} není nutné pokaždé měnit *No. of Used Allocations*, protože při zmenšování B_{LTE} se počet subnosných automaticky zmenší a zaplnění zůstane maximální pro danou šířku (stačí tedy měnit jen šířku pásma a střední frekvenci).

7. Po doměření prvního scénáře, změňte modulaci na SFU z 256QAM na 64QAM (*BICM – CONSTELL. – 64QAM*) a znovu proveďte nastavení generátoru SMU a FSQ jako v bodě 2 a 3. Po odměření všech šířek pásma proměříte třetí scénář-změňte (modulace 64QAM) ještě kódový poměr na 4/5 (*BICM – CODE RATE – 4/5*).
8. Pro vyhodnocování odolnosti DVB-T2 signálu vůči rušícímu LTE se použije parametr carrier-to-interference ratio (C/I), kde C je úroveň signálu na vstupu DVB-T2 přijímače. V měření se nastavovalo $C = -60$ dBm. Poměr C/I se pak vypočte jako $C/I [dB] = C [dBm] - I [dBm]$. Z naměřených hodnot vypočítejte parametr C/I pro všechny 3 scénáře, každý scénář zobrazte v samostatném grafu. V grafu vynesete závislost parametru C/I na B_{LTE} .

Vypracování

1. V prvním bodě zadání jsme nastavovali generátor DVB-T2. Bylo zde nutné správně nastavit všechny parametry ze zadání, zvláštní pozornost byla věnována především záložkám IMPAIRMENTS a FAIDING, které musely pro správné měření být vypnuté.
2. Ve druhé části měření jsme nastavovali generátor LTE. Nejdůležitější bylo nastavení správné střední frekvence vysílání a šířku pásma, aby byla splněná základní koncepce koexistence popsána v teoretickém úvodu úlohy.
3. Při nastavování SPAN a šířky měřeného kanálu na FSQ je důležité, aby hodnoty byly co nejlépe zvolené danému scénáři-oba signály musí být v měřené frekvenční oblasti a také amplituda správně nastavená, aby vycházely co nejpřesnější výsledky.
4. U nastavování jednotlivých STB je důležité při změně měřeného STB správně a úplně připojit koaxiální kabel z FSQ do STB aby nebyla zhoršená kvalita vysílání přidaným útlumem.
5. V pátém a šestém bodě zadání jsme si mohli překreslit nebo uložit na flash disk 4 obrázky spektra pro B_{LTE} 1,4 a 10 MHz. Při stejné úrovni LTE a DVB-T2 lze vidět 1 MHz ochranného pásma a že oba spektra se nepřekrývají. Při větším rušení dochází k částečnému překrytí vysílání DVB-T2 a boční spektrální čáry LTE zasahují přímo do televizního signálu ($B_{LTE} = 20$ MHz).

6.



Obr. 1 Obrázky RF spekter z FSQ analyzátoru pro STB Emos EM180 HD

7. V tomto bodě jsme zkoušeli různé nastavení šířky pásma a hodnoty rušícího výkonu jsme si zapsali do tabulek z kterých se později vytvoří grafy závislosti C/I na B_{LTE} .
8. Po doměření jednoto scénáře jsme změnilí vnitřní modulaci na 64QAM a poté ještě kódový poměr na 4/5. Celý postup jsme opakovali pro každý scénář.

Tabulky

Tab. 1 Naměřené hodnoty pro původní scénář

B_{LTE} [MHz]	Emos		Thomson		IceCrypt	
	I [dBm]	C/I [dB]	I [dBm]	C/I [dB]	I [dBm]	C/I [dB]
1,4	-20	-40	-20	-40	-31,5	-28,5
5	-22,5	-37,5	-23	-37	-45	-15
10	-23,5	-36,5	-22,6	-37,4	-46,1	-13,9
20	-32,7	-27,3	-27,8	-32,2	-44	-16

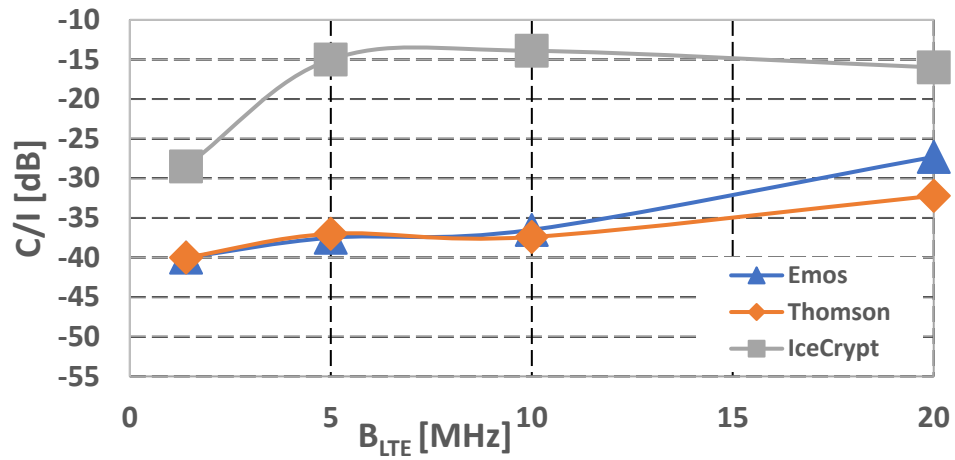
Tab. 2 Naměřené hodnoty pro scénář s modulací 64QAM

B_{LTE} [MHz]	Emos		Thomson		IceCrypt	
	I [dBm]	C/I [dB]	I [dBm]	C/I [dB]	I [dBm]	C/I [dB]
1,4	-13	-47	-11,7	-48,3	-24	-36
5	-15,6	-44,4	-13,8	-46,2	-42,5	-17,5
10	-18	-42	-15,8	-44,2	-44	-16
20	-23	-37	-19,8	-40,2	-42,5	-17,5

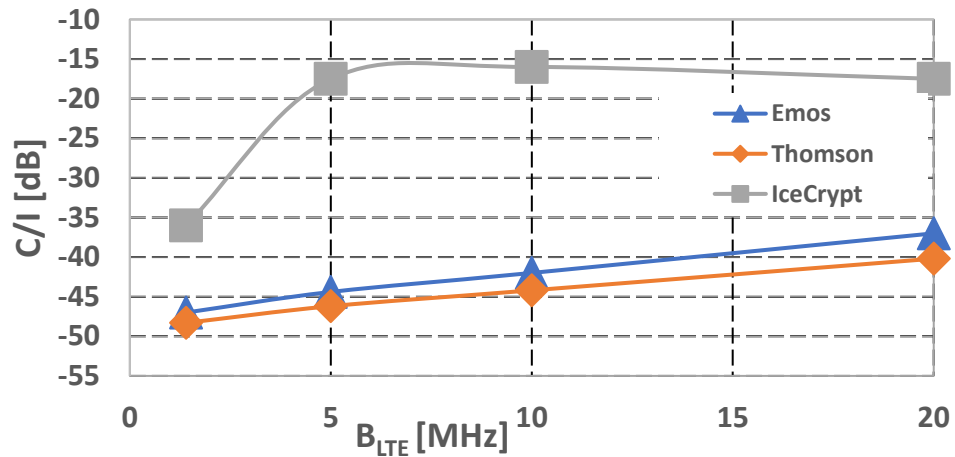
Tab. 3 Naměřené hodnoty pro scénář s modulací 64QAM a CR=4/5

B_{LTE} [MHz]	Emos		Thomson		IceCrypt	
	I [dBm]	C/I [dB]	I [dBm]	C/I [dB]	I [dBm]	C/I [dB]
1,4	-18	-42	-17,5	-42,5	-29,4	-30,6
5	-20	-40	-17,8	-42,2	-44,5	-15,5
10	-22,5	-37,5	-19,6	-40,4	-45,5	-14,5
20	-35,2	-24,8	-30,2	-29,8	-43,2	-16,8

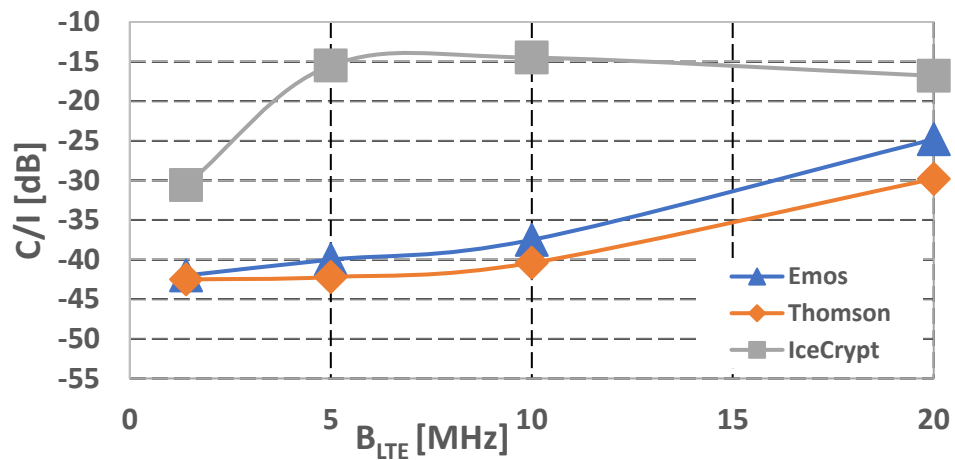
Grafy



Obr. 2 Závislost parametru C/I na parametru B_{LTE} při původním nastavení



Obr. 3 Závislost parametru C/I na parametru B_{LTE} při změně modulace na 64QAM



Obr. 4 Závislost parametru C/I na parametru B_{LTE} při změně modulace na 64QAM a kódovém poměru na 4/5

Závěr

V této úloze jsme se zabývali zkoumáním koexistence DVB-T2 a LTE v pásmu 800 MHz. Výsledné hodnoty jsou podle zadání zobrazené v Obr.2-4, všechny ve stejném měřítku, aby se dalo lépe porovnávat jednotlivé projevené změny v systémových parametrech vysílání DVB-T2. U všech scénářů jsme si potvrdili logický předpoklad, že se bude zvětšovat parametr C/I s šířkou pásma LTE. Dále je patrné, že STB Emos a Thomson jsou na velmi podobné úrovni co se týče odolnosti proti interferencím. Odolnost IceCryptu proti rušení LTE je na nízké úrovni v porovnání s STB Emos a Thomson. Pouze na nejnižší šířce pásma (1,4 MHz) je IceCrypt schopný úspěšně dekodovat signál při větší intenzitě rušení. Rozdíl se pohyboval okolo 15 dB vůči ostatním B_{LTE} . Při změně modulace z 256QAM na robustnější a jednodušší modulaci 64QAM došlo ke zlepšení odolnosti. Tato zlepšení průměrně činí 10 dB pro STB Emos a Thomson, jak je patrné z grafů a tabulek hodnot. Takto upravený signál se hodí do oblastí s horším pokrytím signálu, negativum je, že má menší přenosovou rychlost. Změna kódového poměru z 2/3 na méně odolné 4/5 mělo za následek zhoršení robustnosti, než tomu bylo v referenčním měření. Toto zhoršení odpovídá průměrně 3 dB. Z tohoto měření vyplývá že největší vliv má na odolnost signálu právě kódový poměr a poté až modulace. Výsledky se tedy shodují s teoretickými předpoklady.